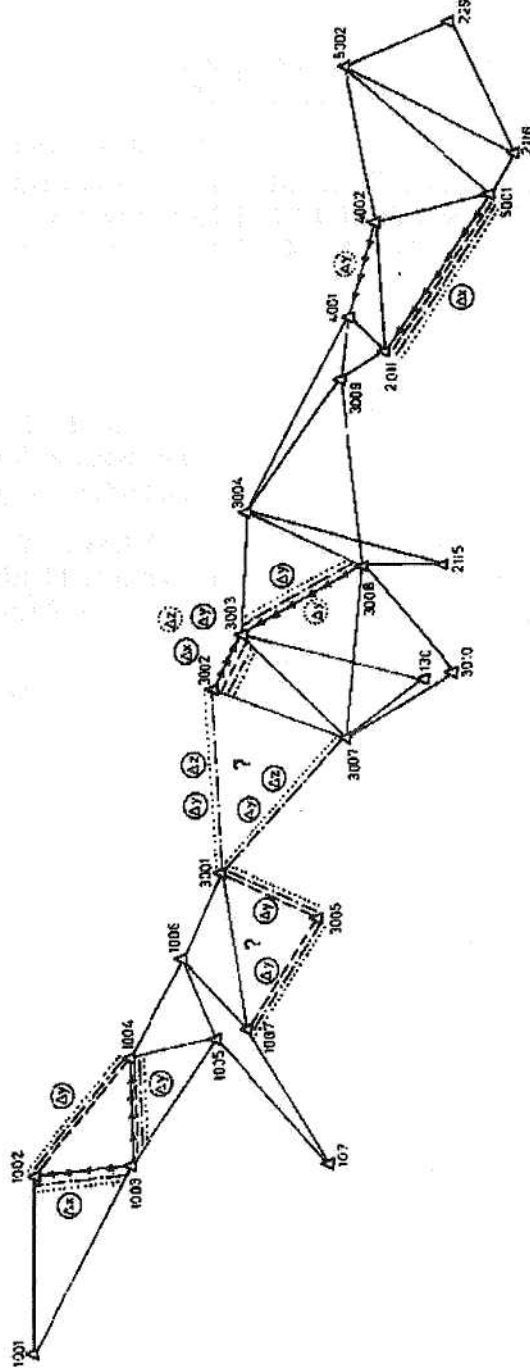


- ① ———— Δ : Uyuşumsuz ölçüler testi
- ① - - - - Δ : Değiştirilmiş 1. tip danimarka fonksiyonu
- ① - · - · - Δ : Model hipotezinin gerçekleştirildiği değiştirilmiş 1. tip danimarka fonksiyonu
- ① - · · · · Δ : Model hipotezinin gerçekleştirildiği değiştirilmiş 2. tip danimarka fonksiyonu
- ① ———— Δ : Yanlızca uyuşumsuz ölçüler testi ile belirlenebilen uyuşumsuz ölçüler



Şekil 1. Trabzon GPS Test Ağı ve Belirlenen Uyuşumsuz Ölçülerin Yerleri

Tablo .1 :Uyuşumsuz Ölçüler Testi ile Belirlenen Uyuşumsuz Ölçüler

Ölçü No	Ölçüler	Serbest Derece	1. İterasyon		2. İterasyon		3. İterasyon		4. İterasyon		5. İterasyon		6. İterasyon		7. İterasyon		8. İterasyon		9. İterasyon					
			$\tau_{f,1-\alpha/2} = 1.95$ $m_{01}=0.784c$ V_1 cm	T_1	$\tau_{f,1-\alpha/2}=1.95$ $m_{02}=0.731$	V_1	T_1	$\tau_{f,1-\alpha/2}=1.95$ $m_{03}=0.679$	V_1	T_1	$\tau_{f,1-\alpha/2}=1.95$ $m_{04}=0.639$	V_1	T_1	$\tau_{f,1-\alpha/2}=1.95$ $m_{05}=0.602$	V_1	T_1	$\tau_{f,1-\alpha/2}=1.95$ $m_{07}=0.558$	V_1	T_1	$\tau_{f,1-\alpha/2}=1.95$ $m_{08}=0.544$	V_1	T_1	$\tau_{f,1-\alpha/2}=1.95$ $m_{09}=0.528$	V_1
1	(1002-1001)Dx	0,38	0,87	1,80	0,87	1,92	0,87	2,07	0,87	2,20	0,87	2,34	0,36	1,22	0,36	1,22	0,36	1,22	0,36	1,29	0,36	1,29	0,36	1,33
2	(1001-1003)Dx	0,38	0,87	1,80	0,87	1,92	0,87	2,07	0,87	2,20	0,87	2,34	0,36	1,22	0,36	1,22	0,36	1,22	0,36	1,29	0,36	1,29	0,36	1,33
3	(1003-1002)Dx	0,53	1,12	1,97	1,12	2,11	1,12	2,27	1,12	2,41	1,12	2,56												
20	(3002-3003)Dx	0,48	1,25	2,31	1,25	2,48	1,25	2,67	1,25	2,83														
35	(4001-3009)Dx	0,56	-0,77	1,32	-0,62	1,15	-0,62	1,24	-0,62	1,32	-0,64	1,43	-0,64	1,50	-0,64	1,54	-0,64	1,54	-0,64	1,58	-0,64	1,58	-0,64	1,63
39	(2011-4002)Dx	0,55	1,12	1,93	0,13	0,29	0,13	0,31	0,13	0,33	0,11	0,31	0,13	0,37	0,13	0,38	0,13	0,39	0,13	0,39	0,13	0,39	0,13	0,40
40	(5001-2011)Dx	0,45	1,61	3,07																				
51	(1004-1002)Dy	0,44	-1,21	2,34	-1,21	2,50	-1,21	2,70	-0,50	1,43	-0,50	1,52	-0,50	1,60	-0,50	1,64	-0,50	1,69	-0,50	1,69	-0,50	1,69	-0,50	1,73
52	(1003-1004)Dy	0,55	-1,43	2,46	-1,42	2,63	-1,43	2,84																
61	(1007-3001)Dy	0,52	0,84	1,48	0,84	1,59	0,84	1,71	0,82	1,77	0,82	1,89	0,82	1,98	0,82	2,04	0,82	2,09	0,82	2,09	0,82	2,09	0,82	2,15
62	(1007-3005)Dy	0,38	-0,99	2,05	-0,99	2,20	-0,99	2,37	-1,00	2,54	-1,00	2,70	-1,00	2,83	-1,00	2,9+Q3	-1,00	2,98	-1,00	2,98	-1,00	2,98	-1,00	3,07
63	(3005-3001)Dy	0,38	-0,99	2,05	-0,99	2,20	-0,99	2,37	-1,00	2,54	-1,00	2,70	-1,00	2,83	-1,00	2,91	-1,00	2,98	-1,00	2,98	-1,00	2,98	-1,00	3,07
64	(3011-3002)Dy	0,39	1,19	2,44	1,19	2,62	0,66	1,68	0,66	1,79	0,66	1,90	0,66	1,99	0,66	2,05	0,66	2,10	0,66	2,10	0,66	2,10	0,66	2,16
65	(3007-3001)Dy	0,39	1,19	2,44	1,19	2,62	0,66	1,68	0,66	1,79	0,66	1,90	0,66	1,99	0,66	2,05	0,66	2,10	0,66	2,10	0,66	2,10	0,66	2,16
66	(3007-3002)Dy	0,54	0,40	0,69	0,40	0,74	-0,66	1,68	-0,66	1,79	-0,66	1,90	-0,66	1,99	-0,66	2,05	-0,66	2,10	-0,66	2,10	-0,66	2,10	-0,66	2,16
67	(3002-3003)Dy	0,48	1,59	2,93	1,59	3,14																		
73	(3008-3003)Dy	0,61	-1,18	1,94	-1,18	2,08	-0,85	1,65	-0,85	1,65	-0,85	1,75	-0,85	1,95	-0,85	2,00	-0,85	2,00	-0,85	2,00	-0,85	2,00	-0,85	2,05
82	(4001-3009)Dy	0,56	-0,81	1,39	-0,81	1,49	-0,83	1,64	-0,83	1,74	-0,83	1,84	-0,83	1,94	-0,83	1,99	-0,83	1,99	-0,79	1,97	-0,79	1,97	-0,62	1,67
83	(2011-3009)Dy	0,45	0,73	1,39	0,73	1,49	0,72	1,59	0,72	1,69	0,72	1,79	0,72	1,88	0,72	1,93	0,72	1,93	0,74	2,03	0,74	2,03	0,45	1,39
85	(4002-4001)Dy	0,45	-0,74	1,41	-0,74	1,52	-0,74	1,63	-0,74	1,73	-0,74	1,84	-0,74	1,93	-0,74	1,98	-0,74	1,98	-0,74	2,05	-0,74	2,05	-0,74	2,05
111	(3001-3002)Dz	0,39	1,32	1,63	1,32	1,75	1,32	1,88	1,32	2,00	1,32	2,12	1,32	2,23										
112	(3007-3001)Dz	0,39	1,32	1,63	1,32	1,75	1,32	1,88	1,32	2,00	1,32	2,12	1,32	2,23										
114	(3002-3003)Dz	0,48	1,36	1,51	1,36	1,62	1,36	1,75	1,36	1,85	1,36	1,97	1,36	2,06										

Tablo 2: Robust Kestirim Yöntemleri İle Belirlenen Uyuşumsuz Ölçüler

Ölçü No	Ölçüler	Serbestlik Derece, $r_1 =$	Değiştirilmiş 1. Tip Danimarka Fonksiyonu					Model hipotezinin Gerçekleştirildiği Değiştirilmiş 1. Tip Danimarka Fonksiyonu					Model Hipotezinin Gerçekleştirildiği Değiştirilmiş 2. Tip Danimarka Fonksiyonu				
			1. İterasyon $m_0=0.78$ cm		5. İterasyon $m_0=0.58$		1. İterasyon $m_0=0.78$		5. İterasyon $m_0=0.51$		1. İterasyon $m_0=0.78$		5. İterasyon $m_0=0.46$				
			v_i cm	c_i	f_i	w_i	v_i	c_i	f_i	w_i	v_i	c_i	f_i	w_i	v_i	c_i	f_i
1	(1002-1001)Dx	0,38	0,87	0,97	0,38	1,00	0,53	0,76	0,31	1,00	0,38	0,76	0,28	0,28	1,00		
2	(1001-1003)Dx	0,38	0,87	0,97	0,38	1,00	0,53	0,76	0,31	1,00	0,38	0,76	0,28	0,28	1,00		
3	(1003-1002)Dx	0,53	1,12	1,14	0,53	1,00	1,79	0,89	0,84	0,13	2,11	0,89	0,99	0,004	0,004		
20	(3002-3003)Dx	0,48	2,30	1,08	0,88	0,12	2,46	0,84	0,94	0,05	2,62	0,84	1,00	0,0001	0,0001		
35	(4001-3009)Dx	0,55	-0,65	1,17	0,55	1,00	-0,64	0,92	0,55	1,00	-0,64	0,92	0,55	1,00	1,00		
39	(2011-4002)Dx	0,55	0,22	1,17	0,40	1,00	0,16	0,91	0,39	1,00	0,14	0,91	0,38	1,00	1,00		
40	(5001-2011)Dx	0,45	3,43	1,05	0,95	0,04	3,54	0,82	0,98	0,01	3,60	0,82	1,00	0,00	0,00		
51	(1004-1002)Dy	0,44	-1,46	1,04	0,69	0,24	-1,50	0,81	0,81	0,16	-1,60	0,81	0,95	0,02	0,02		
52	(1003-1004)Dy	0,55	-1,75	1,16	0,79	0,22	-1,79	0,91	0,84	0,14	-1,83	0,91	0,97	0,02	0,02		
62	(1007-3005)Dy	0,38	-1,20	0,97	0,46	0,29	-1,23	0,76	0,47	0,20	-1,28	0,76	0,49	0,06	0,06		
63	(3005-3001)Dy	0,38	-1,20	0,97	0,46	0,29	-1,23	0,76	0,47	0,20	-1,28	0,76	0,49	0,06	0,06		
64	(3001-3002)Dy	0,39	0,94	0,97	0,43	1,00	0,93	0,76	0,44	0,30	0,88	0,76	0,44	0,26	0,26		
65	(3007-3001)Dy	0,39	0,94	0,97	0,43	1,00	0,93	0,76	0,44	0,30	0,88	0,76	0,44	0,26	0,26		
67	(3002-3003)Dy	0,48	2,66	1,08	0,89	0,09	2,55	0,84	0,93	0,05	2,66	0,84	1,00	0,0001	0,0001		
73	(3008-3003)Dy	0,61	-0,91	1,22	0,59	1,00	-1,27	0,96	0,85	0,26	-1,31	0,96	0,90	0,15	0,15		
82	(4001-3009)Dy	0,55	-0,82	1,17	0,55	1,00	-0,81	0,92	0,55	1,00	-0,81	0,92	0,55	1,00	1,00		
85	(4002-4001)Dy	0,45	-0,74	1,05	0,45	1,00	-0,74	0,82	0,45	1,00	-0,75	0,82	0,45	1,00	1,00		
111	(3001-3002)Dz	0,39	1,32	1,62	0,39	0,36	1,58	1,27	0,46	0,10	1,62	1,27	0,47	0,07	0,07		
112	(3007-3001)Dz	0,39	1,32	1,62	0,39	0,36	1,58	1,27	0,46	0,10	1,62	1,27	0,47	0,07	0,07		

GPS'TE TAMSAYI BELİRSİZLİĞİ ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Çetin MEKİK'

Hakan AKÇIN"

ÖZET

GPS uydularıyla konumlamada iki tür ölçü yapılabilmektedir: Ön-uzunluk¹ ve taşıyıcı dalga faz farkı² ölçüleri. Sinyallerin P-kod veya C/A-kod ölçülerinin duyarlılığı, sırasıyla 3-10 m ve 15-30 m 'dir. Taşıyıcı dalga faz farkı ölçülerini bir kaç milimetre duyarlılıkla elde etmek mümkün olabilmektedir. Bu duyarlılığa erişebilmek için "başlangıç faz belirsizliği" bilinmelidir. Bu belirsizliği çözmek amacıyla bir çok yöntem geliştirilmiştir. Bu yayında geliştirilen çözüm yöntemlerinin en yaygın olanları ve bunların çalışma ilkeleri özetlenmiştir.

1. GİRİŞ

GPS ile konumlamada kullanılan faz ölçüleri aslında, bir uydudan yayımlanan taşıyıcı sinyalin fazı ile belli bir anda alıcıda oluşturulan taşıyıcı sinyal fazı arasındaki fark olduğundan, konumlanması istenen nokta için uydu ile alıcı arasındaki tam dalga boylarının sayısı bilinmemektedir. Buna "başlangıç belirsizliği" ya da "tamsayı belirsizliği" denilmektedir. Bu belirsizlik, GPS faz ölçmelerinin üstün doğruluklu konumlama potansiyelinden yararlanabilmek için uygun yöntemlerle çözümlenmelidir. GPS gözlemlerinden yararlanan jeodezik yöntemlerde belirsizliğin çözümü, bu alandaki en sorunlu konulardan biridir. Öte yandan; faz belirsizliklerinin tamsayı doğası da GPS ile bağlı konumlamada yüksek doğruluğa ulaşmayı sağlamakta ve belirsizliğin çözülmesiyle de genellikle

baz çözümü güçlendiğinden baz vektörlerinin çözümü için çok önemli olmaktadır. Yine bu bağlamda, baz uzunluğu nedeniyle tamsayı belirsizliği çözümünün her zaman mümkün olmadığı da burada vurgulanmalıdır. Tamsayı belirsizliği, aşağıdaki genel faz eşitliğinde N ile gösterilmiştir.

$$O = f_{Ve} + A5 \frac{f}{c} J + N \quad (1)$$

Burada p uydu ile alıcı arasındaki uzaklık, f ve c sinyalin frekans ve hızı, A5 saat hatası, D_f iyonosferik gecikmedir.

* Yrd.Doc.Dr. (ZKÜ)

"Arş.Gör. (ZKÜ)

¹ ön-uzunluk: pseudorange

² taşıyıcı dalga faz farkı: carrier beat phase

Taşıyıcı faz işlemlerinde çiftli-farkların³ tekli-farklar⁴ yerine kullanımı, alıcı saat hatasının yok edilmesi mümkün olduğundan önemlidir. Taşıyıcı faz biçimleriyle yüksek doğruluklu konum belirlenebilmesi için, belirsizliklerin doğru tamsayı değerlerinin bulunması gerekmektedir. Kısa bazlar göz önüne alındığında atmosferik ve diğer küçük etkilerin ihmal edilebilmesi mümkün olmakta ve çiftli-fark faz modeli basitleştirilerek şu şekilde yazılabilmektedir:

$$A \langle D \rangle = \mathbf{f} + \mathbf{N} + \mathbf{bh} \quad (2)$$

A,

Burada; X ile taşıyıcı sinyalin dalgaboyu, \mathbf{bh} ile de sistemin birikme hatası⁵ ifade edilmektedir.

Belirsizliklerin çözümündeki diğer önemli nokta ise uydu geometrisidir. Gözlemlenen uyduların sayısı iyi bir duyarlık bozunumunu⁶ (DOP) etkileyeceğinden dikkate alınmalıdır. Bununla birlikte belirsizlikleri çözmek için gerekli gözlem süresinin uzunluğu da geometri açısından önem arz etmektedir. Bunu şöyle bir örnekle açıklayabiliriz. Elimizde iki veri kümesi alalım; bunlardan ilkinde gözlemler 20 saniyelik epoklarla bir buçuk saatlik bir gözlem süresinde, diğeri ise iki saniyelik aralıklarla dokuz dakika sürecince yapılmış olsun. Her ikisinde de her uyduya toplam 270 ölçme gerçekleştirilmiştir. Ölçme sayısı her iki veri kümesinde de aynı olmasına karşın içerdikleri bilgi bakımından aynı değildir.

³ çiftli-fark: double difference

⁴ tekli-fark: single difference

birikme hatası: (system) noise

duyarlık bozunumu : Dilution of Position (DOP)

İlk veri kümesinin doğru belirsizlik çözümü olasılığı geçen sürenin uzunluğu nedeniyle daha yüksektir. Belirsizlik çözümünde iyi geometrik koşullar altında bile zaman önemli bir etmendir.

En iyi ve en basit belirsizlik çözümü, yersel elektronik uzaklık ölçmelerinde olduğu gibi ek bir frekans ya da sinyal kullanımıdır. Ne var ki, GPS şimdilik iki frekanstan fazlasını bize sunmamaktadır. Bu yüzden, belirsizlik problemini çözmek amacıyla sayısız yöntemler, stratejiler geliştirilmiştir; fakat burada bir çoğuna çıkış sağlayan sadece bir kaçının ana ilkeleri tanıtılacaktır. Ancak bu yöntemleri daha iyi anlayabilmek için önce çift-frekanslı faz verileriyle belirsizlik çözümü-ndeki faz kombinasyonlarının mantığını anlamamız yerinde olacaktır.

2. FAZ KOMBİNASYON-LARIYLA BELİRSİZLİK ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Çeşitli olası doğrusal faz kombinasyonlarının belirsizlik çözümünde kullanılmasının bir çok yaran vardır. Bunlardan geniş-dalga sinyali şu şekilde verilebilir:

$$\langle I \rangle_5 = \langle \mathbb{R} \rangle_j - \langle \mathbb{R} \rangle_2 \quad (3)$$

Buradaki O_1 ve $\langle I \rangle_2$, uydudan gönderilen L_1 ve L_2 sinyallerinin faz verileridir. Bu sinyalin frekansı f_5 : 347.82 MHz ve dalga boyu ise $A_{5,5}$:86.2 cm'dir. L_1 ve L_2 sinyallerinin dalga boylan düşünüldüğünde X_5 önemli bir genişliğe sahiptir; bu yüzden belirsizlik aralığını genişletmekte ve tamsayı belirsizliklerinin daha kolay çözümüne olanak sağla-maktadır. Bunun ana ilkesini sergilemek amacıyla (1) bağıntısını L_1 ve

L1 sinyalleri için ayrı ayrı yazıp farkını alırsak (3) bağıntısıyla verilen geniş-dalga fazının açık halini elde etmiş oluruz.

Burada her iki sinyalin frekanslarının ve belirsizliklerinin farklarını teker teker yazmak yerine geniş-dalga sinyaliyle olan notasyon bütünlüğünü korumak amacıyla f_5 ve N_5 simgeleri kullanılmıştır.

(1) bağıntısının L1 sinyali için yazılmış olanından geniş-dalga sinyali bağıntısını (4) çıkartır ve eşitliğin sol tarafındaki $(\oplus, <D_5)$ ifadesini sağ tarafa alarak bilinmeyen L1 sinyalinin belirsizliğini N_1 sol tarafa alıp düzenleyerek yazarsak, L1'in faz belirsizliği N_1 elde edilir:

$$N_1 = \left[n - \left(\frac{\% - N_5}{\%} \right) f_3 \right] \frac{c}{V} \quad (5)$$

Benzer yolla Z2'nin faz belirsizliği N_2 de elde edilir. Burada görüldüğü üzere uzaklık p ve saat hatası AS terimleri elimine edilmiştir; ancak N_5 'in içinde gizli olarak bulunmaktadır (bkz (4) bağıntısı). Yukarıdaki (5) bağıntısındaki iyonosferik terim hâlâ belirlenmeyi beklemektedir. Bu terim kısa bazlarda her iki uçtaki benzer iyonosferik kırılma olduğunda fazların farkının alınması nedeniyle yok olacaktır. Ancak uzun bazlarda ya da düzensiz iyonosferik koşullar için sorun çıkarabilmektedir.

Geniş-dalga doğrusal kombinasyonundan farklı olarak başka kombinasyonlar da göz önüne alınabilir. Örneğin

iyonosfersiz doğrusal kombinasyonu O_3 şu şekilde yazılabilir:

$$\textcircled{3} = \frac{f_2}{M} - 7 - \#2 \quad (6)$$

Başka bir kombinasyon biçimi olarak dar-dalga doğrusal kombinasyonu da şöyle verilebilir:

$$O4 = O1 + \textcircled{2} \quad (7)$$

Buradaki dar-dalga fazının dalga boyu A.4 :10.7 cm'dir. Bunlardan başka kombinasyonlar (örneğin, çok geniş-dalga ya da çok fazla geniş-dalga) ve kullanımları için (Wübbena, 1989) önerilmektedir.

İyonosfersiz faz O_3 'm olumsuzluğu, buna karşılık gelen belirsizliğinin bir tamsayı olmamasıdır. Bu bir çeşit kısır döngüyü ifade etmektedir; ya iyonosfer sorun olmaya devam ederken belirsizlikler çözülmekte ya da belirsizliklerin tamsayı yapısını bozan iyonosfersiz çözüm elde edilmektedir. Dar dalga fazı kısa bazlarda çok iyi sonuçlar verirken bazlar uzadıkça belirsizlikleri çözmede yetersiz kalmaktadır.

3. GEOMETRİK BELİRSİZLİK ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Bu yöntem; çözüm için alıcı ile uydu arasındaki geometrik ilişkinin zamana bağımlı değişiminden ve genellikle kesintiye uğramamış faz ölçmelerinden yararlanmakta, belirsizlikleri gerçel sayılar⁷ olarak kestirmektedir. Uydu sinyalleri alıcı tarafından tanımlandıktan sonra, gelen devirler⁸ ölçülüp tümü sayılır. Bilinmeyen başlangıç belirsizliği

gerçel sayılar : reel numbers
devir: cycle

N, gözlem süresince korunmakta ve tek bir parametreyle gösterilebilmektedir. Taşıyıcı fazların ke-sintisiz izlenmesi belirsizlikten arınmış uzunluk farklarının belirlenmesine olanaklıdır. Bunlar kullanıcı anteninin koordinatlarını belirlemek amacıyla Dopp-ler çözümünde kullanılır. Anten ile uydu-lar arasındaki belirsizlikten arınmış ön-uzunluklar, Doppler çözümünden türetilerek belirsizlikli uzunluk gözlemleriyle karşılaştırılır ve bu karşılaştırmayla belirsizlikler doğrudan bulunabilir (Seeber, 1993).

Bu yöntem oldukça uzun gözlem zamanına sahip ölçmelerde, diğer bir deyişle geometri değişimi yeterince büyükse, iyi sonuç vermektedir. Alıcının bir ya da daha fazla uydudan sinyal alımı kesintiye uğrarsa ve geride kalan eş-zamanlı gözlemlenen uydu sayısı dörtten az ise, yeni bir başlangıç belirsizliği tanımlanmalıdır. Buna "sinyal sıçraması problemi"⁹ adı verilmektedir. Dörtten fazla uydu olması durumunda, belirsizlikler birbirinden bağımsız değildirler.

Kestirilen belirsizlikler gerçek sayılardır ve belirsizliklerin gerçek sayılar olarak belirlenmesizne *taşan belirsizlik*¹⁰ veya *serbest belirsizlik çözümü* denilir. Bunlar, kestirilen değerler bir tamsayıya çok yakınsa ya da başka bir ifadeyle uydu doğrultusundaki bağıl konum hatası yarım dalga boyundan küçükse, tamsayılarla sabitlenebilirler; buna *belirsizlik*

⁹ sinyal sıçraması problemi: cycle slip problem

taşan ya da gerçek değer belirsizlik çözümü: ambiguity float solution

serbest belirsizlik çözümü : ambiguity free solution

*sabitleme çözümü*¹¹ denilir. Bu gereksinim, gözlem sürelerinin uzun olmasını öngörmektedir. Gözlem sürelerinin kısaltılması, ilave uyduların, iyi bir geometrinin ve daha geniş dalga boylu sinyallerin kullanımıyla mümkündür.

Kesin ve basit bir modelle çözüm sağlanması geometrik yöntemin önemli bir yarandır; diğer bir yaran da taşan belirsizlik çözümü hızlı bir biçimde yaklaşık sonuçları vermesidir. Kısa bazlarda yöntem güvenilir sonuçlar vermektedir. Ne var ki, troposfer, iyonosfer ve uydu yörüngesinden kaynaklanan modellenmemiş sistematik hatalann gözlemlerde çözülmeden kaldığında sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu hatalann sonuca etkisi bazlar büyüdükçe artmakta ve güvenilir belirsizlik çözümünü zorlaştırmakta ya da olanaksız hale getirmektedir. Tamsayı belirsizliğinin yanlış belirlenmesi, koordinatlarında sistematik hatalann oluşmasına neden olmaktadır.

4. FAZ VE KOD VERİLERİYLE BELİRSİZLİK ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Önceki bölümde tanımlanan geniş-dalga yönteminin en güvenilir etmeni baz uzunluğu ile artan iyonosferin etkisidir. Bu durum faz ve kod verilerinin kombinasyonu ile düzeltilebilir; diğer bir deyişle, belirsizlik sorunu olmayan kod ölçmeleri, taşıyıcı faz belirsizliğini çözmek amacıyla ek bir dalga boyu olarak kullanılmaktadır.

¹¹ belirsizlik sabitleme çözümü : ambiguity fixed solution

Genel faz modeli (1) eşitliği ile verilmişti; şimdi kod uzunlukları için genel modeli şu biçimde tanımlayabiliriz:

$$R = f_c + \frac{f_A}{c} + \frac{f_5}{c} \quad (8)$$

Faz ve kod bağıntılarının her iki L1 ve L2 sinyalleri için yazıp $(O_1 - \hat{s})$ ve $(R_1 - R_2)$ farklarını oluşturduktan sonra bunları birbirinden çıkartırsak:

elde edilir. İyonosferik terimi yok etmek amacıyla yapılan çeşitli düzenleme ve müdahalelerden¹³ sonra, geniş-dalga belirsizliği N_5 'i eşitliğin sol tarafına, bilinenleri ise sağ tarafına alıp yazarsak şu bağıntıyı buluruz:

$$N_5 = \frac{1}{c} - (R_1 + R_2) - \hat{s} \quad (10)$$

Bu bağıntıyla; geniş-dalga belirsizliği N_5 'in her epok ve her durak için belirlenmesi mümkün olmakta, baz uzunluğundan ve iyonosferik etkilerden arınmış olmaktadır. Ne var ki, tüm sistematik hatalardan arınmış olsa bile çokyolluluk¹⁴ etkisi kalmakta, faz ve kodu farklı olarak etkilemektedir ve N_5 'te bir kaç devir kadar değişim yapmaktadır: Bu da değişimlerin uzun bir süreç için ortalaması alınarak giderilebilmektedir.

Geniş-dalga belirsizlikleri hesaplandıktan sonra her bir L1 ve L2 sinyali için belirsizlikler hesaplanır.

¹⁴ Bu düzenleme ve müdahaleleri ayrıntılı olarak (Hořmann-Wellenhof vd., 1997)'de bulabilirsiniz

çokyolluluk: multipath

Bunun için yine her iki fazın farkı alınıp L1 sinyalinin tamsayı belirsizliği N_1 'i bulmak amacıyla N_2 yerine $(N_1 - N_5)$ ifadesi konarak gerekli düzenlemeler yaparsak bağıntı şu hale gelir:

$$N_1 = \frac{1}{c} - [f_1 - f_2 - f_2 N_5] - (f_1 + f_2) \quad (11)$$

Bağıntıdan da görüldüğü üzere N_1 belirsizlikleri iyonosfersiz olarak hesaplanabilmektedir. Yöntem; kod çözümünün birikme hata düzeyi, taşıyıcı dalganın dalga boyunun yansından daha az oluncaya kadar ölçmeleri yapmakla iyi sonuçlar verir.

Geniş-dalga belirsizliği doğru olarak çözüldükten sonra diğer fazların belirsizlikleri, iyonosfer iyi modellenmek koşuluyla geometrik yöntemle de çözümlenebilir. Bunlara örnek olarak iyonosfersiz sinyalin belirsizliği ya da dardalganın belirsizliği verilebilir. Dar-dalga çözümü kısa kenarlarda düşük birikme hata düzeyine sahip olduğundan duyarlıklı uygulamalara daha uygundur. Ancak daha önce de belirtildiği gibi dar-dalga fazı çok küçük dalga boyuna sahip olduğundan büyük uzunluklu bazların çözümünü yapmakta yetersiz kalmaktadır.

5. ARAMA YÖNTEMLERİ

Belirsizlik arama yöntemleri¹⁵, bir gözlem noktasındaki gerekli gözlem süresini kısaltmak amacıyla geliştirilmişlerdir. Bu yöntemler, ne kadar çok uydu varsa o kadar iyi sonuç verirler. Yöntemlerin temel düşüncesi, L1, L2 ve kombinasyon sinyallerinin optimum belir-

belirsizlik arama yöntemleri: ambiguity search techniques

sizlik kombinasyonunu aramaktır. Arama algoritması genellikle başlangıç taşan belirsizlik çözümü ile başlar ve sonradan bazı optimizasyon teknikleri kullanılarak çözüm vektörünü belli bir tamsayı değerlerle sınırlar. Önceden tanımlanan bir "belirsizlik uzayı"¹⁶ içindeki olası kombinasyonlar incelenir. Bu yöntemlerden en çok kullanılanları çeşitli uygulama durumları için aşağıda irdelenmiştir.

5.1 Statik Konumlamada Arama ile Belirsizlik Çözüm Yöntemi

Çiftli-fark verilerim en küçük kareler yöntemiyle dengelerken, belirsizlikler gerçel ya da kayan/taşan nokta sayıları olarak kestirilirler. Buradan elde edilen sonuçlar, çiftli-fark belirsizlikleri olduğu gibi nokta koordinatlarının da en iyi kestirimidirler.

Gözlem aralığı kısaltıldıkça gerçel değer çözümü, veri eksikliği nedeniyle zayıflamaktadır. Böylece belirsizlik çözümünün nokta koordinatları üzerindeki etkisi artacağından önemli bir sorun haline gelecektir. Bu nedenle gözlem süresini kısaltmak suretiyle arama aralığını azaltmak iyi bir çözüm olmamakta, onun yerine daha basit bir yaklaşım olan gerçel değer belirsizliklerin hesaplanan doğru luklarını, onların arama aralığını saptamak amacıyla doğrudan kullanmak tercih edilmektedir. Örneğin; bir belirsizlik 0.3 devir standart sapma ile 26468191.76 devir olarak kestirilirse, bu değer ± 3 standart sapma aralığında kalan tüm tamsayı belirsizliklerinin aranması gerekir. Bu ise en dar anlamıyla

26468190.0 ile 26468193.0 arasındaki olası tamsayı belirsizliklerini¹⁷ verecektir.

Olası belirsizlik kombinasyonları tanımlandıktan sonra, belirsizlikleri seçilen tamsayı kombinasyonuna sabitleyerek her biri test edilir ve ölçü artık hataları¹⁸ hesaplanır. Sadece nokta koordinatları kestirildiğinden toplam serbestlik¹⁹, belirsizlik sabitleme dengelemesinde artmaktadır. Ne var ki, artık hataları gerçel değer belirsizlik çözümününkinden daha büyük olmaktadır.

Belirsizlik kombinasyonunun seçimine ilişkin son ölçüt de karesel hataların toplamıdır (KHT). En küçük değere sahip KHT'ye karşılık gelen tamsayı belirsizliği çözümü, bizim çözüm adayımız olacaktır. Ancak yukarıda açıklanan nedenlerden ötürü hiç bir aday, bir diğerinden daha anlamlı bir seçim gerçekleştiremeyecektir. Bu durumda, oran testi bir karara varmak için sıkça başvurulan bir yöntemdir. Örneğin, ikinci en küçük KHT'nin en küçük KHT'ye oranı 2 veya 3 ise doğru çözüm olarak en küçük KHT'nin seçilmesine yönelik bir karara varılabilir. Aksi durumda, hiç bir belirsizlik çözümü belirlenemeyecek ve nokta koordinatlarının en iyi kestirimi gerçel değer çözümü olacaktır.

Tablo 1: Çift-farklar kombinasyonlarına göre taşan belirsizlik ve belirsizlik çözüm değerleri (Cannon-Wellenhof vd., 1997)

olası tamsayı belirsizlikleri: potential integer ambiguities

18

ölçü artık hataları: measurement residuals

19

serbestlik: redundancy

belirsizlik uzayı: ambiguity space

ÇFUN	Taşan belirsizlik	Belirsizlik		
		1. en küçük KHT=0.044	2. en küçük KHT=0.386	3. en küçük KHT=0.453
2 – 19	17 329 426.278	17 329 426	17 329 426	17 329 426
6 – 19	14 178 677.032	14 178 677	14 178 676	14 178 678
11 – 19	11 027 757.713	11 027 758	11 027 757	11 027 759
16 – 19	-1 575 518.876	-1 575 519	-1 575 518	-1 575 520
18 – 19	-15 754 175.795	-15 754 176	-15 754 176	-15 754 176

Bu durumu nesnel hale getirmek için tablo l'de verilen şu uygulamayı ele alalım. (Cannon veLachopelle, 1993) Altı uydu, 720 m'lik bir bazda 10 dakika süresince gözlemlenir. 19 no'lu uyduyu referans uydusu alan çiftli - farkları kullanarak en küçük kareler dengelemesinden taşan belirsizlikler, devir birimi olarak bulunur.

Bu tabloda kullanılan ÇFUN kısaltması belli bir Uydu Numarasına karşılık gelen Çiftli-Farkları göstermek için kullanılmıştır. Tamsayı değerler elde etmek amacıyla taşan belirsizlikler sadece en yakın tamsayıya yuvarlatılmıştır. Bu çözümü denetlemek için, yukarıdaki tablodan elde edilen tamsayı çözümlerinden ayrı olarak olası diğer belirsizlik kümeleri, belli bir aralıkta her belirsizliği değiştirerek oluşturulmuştur; bu aralığa örnek olarak ± 2 devir alınır, her belirsizlik -2, -1 ve +1, +2 devir kadar değiştirilmiş olur. Bunun anlamı, her belirsizlik için beş durum denetlenmiş olmasıdır. Beş çiftli-fark gözönüne alındığında, KHT'leriyle karşılaştırılması gereken toplam $5^5=3125$ tane olası tamsayı kümesi meydana gelir. Tabloda

taşan belirsizlik sütununun hemen yanında üç tane en küçük KHT verilmiştir.

En küçük KHT'ye sahip belirsizlik kümesinin, sadece 2. en küçük KHT'ye kıyasla oldukça küçük değere sahipse doğru tamsayıları içermesi güçlü olasılıktır. Yukarıdaki tablodaki oran ($0.386/0.044=8.8$ olduğundan) 3'ten büyük olmaktadır. Bu oran testi iyi sonuç vermezse; belli bir nokta için en iyi kestirim olarak, çiftli-fark taşan belirsizlik çözümünden elde edilen koordinattan kullanmak daha güvenlidir.

5.2 Kinematik Konumlamada Arama ile Belirsizlik Çözüm Yöntemleri

Kinematik durum için sayısız yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin bir başlangıç çözümünün belirlenmesi gibi ortak özellikleri olmakla birlikte ayrıldıkları nokta, bu özelliklerin nasıl yerine getirileceğidir.

Konumlama kinematik olarak yapıldığında belirsizlik çözümünün çok kısa süre içinde yapılması gibi zorunluluk olduğundan çözümü bulmaya yönelik deneme sayısının azaltılması amacıyla yapılan çiftli-fark düzlem arakesiti işlemi burada önem kazanmaktadır. Konumlar,

olası belirsizlik kümeleri olan üç çiftli-farktan elde edilmektedir. Geometrik olarak, deneme belirsizliğiyle her doğrusallaştırılmış çiftli-fark üç boyutlu uzayda bir düzlem belirler (Hatch, 1990). Bu durumda üç düzlemin arakesiti olası çözüm konumunu vermektedir. Kareler-ağı²⁰ aralığı, taşıyıcının dalga boyudur ve belirsizlik arama tabanındaki²¹ kareler-ağı aralığına eşittir.

Seçme ölçütü olarak ölçülerin varyansını minimize etmek temelde karesel hataların toplamını minimize etmekle aynıdır. Alıcının konumu bir eşleme fonksiyonu²² ile elimine edilirse, artık hatalar sadece belirsizlikleri verecektir (Walsh, 1992).

Aşağıda, kullanılan bir çok kinematik belirsizlik çözme yöntemlerinden bazıları açıklanmaktadır. Bunlar; belirsizlik fonksiyonu yöntemi, en küçük karelerle belirsizlik arama yöntemi, hızlı belirsizlik çözümü yaklaşımı, hızlı belirsizlik arama filtresi ve özel koşullarla belirsizliğin bulunmasıdır.

5.2.1 Belirsizlik Fonksiyonu Yöntemi

Bu yöntemin temel ilkesi [Counselman ve Gourevitch, 1981] tarafından öne sürülmüş ve [Remondi, 1984 ve 1990] ve [Mader, 1990] tarafından geliştirilmiştir. Yöntemin özünü anlayabilmek için tekli-fark faz (O) modelini bilinen bir i noktası ile bir arama küpü içindeki bilinmeyen bir j noktası arasında oluşturup, bilinenleri sol tarafa bilinmeyenleri sağ tarafa alıp yazarsak:

kareler-ağı: grid
taban: domain
eşleme fonksiyonu : mapping function

$$\mathbb{R}-\mathbb{f} = N-f\delta \quad (12)$$

elde edilir. Doğal olarak, bu bağıntıdaki N belirsizliklerini ortaya çıkarmak ana hedefimizdir. 2TIN terimi cosinüs veya sinüs fonksiyonun argümanı olarak alındığında N bir tamsayı olduğundan özel bir durum meydana gelir. Bu nedenle tüm ifade (12) 2K ile çarpılıp, sağ ve sol taraf e¹ 'nin üssü olarak kompleks duruma getirilir:

$$\hat{I} = V-I \quad (13)$$

Eşitliğin sağ tarafı şu şekilde çarpanlara ayrılabilir:

$$e^{i(27i<D-27tpA)} _ e^{i27iN_e i27if6} \quad (M)$$

Bu durumu kompleks düzlem düşünmek biçimsel görmeyi kolaylaştıracığından, şu ifadeyi dikkate alalım:

$$e^{ia} = \cos a + i \sin a \quad (15)$$

bu da bir gerçel ve bir de sanal eksen kullanıldığında bileşenleri cos a ve sin a olan bir birim vektör olarak gösterilebilir, a yerine 2TTN değerini koyarsak:

$$e^{i2itN} = \cos(2T\hat{I}N) + i \sin(27iN) = \mathbf{1} + \mathbf{i} - \mathbf{0} \quad (16)$$

N bir tamsayı olacağından dolayı, 27t=360°'yi hangi tamsayıyla çarparsanız çarpın cosinüsü 1 ve sinüsü 0 (sıfır) olacaktır. Böylece bir epok ve bir uydu için:

$$o_i(2n\mathbb{R}-2np/k) = o-I2nfd \quad (17)$$

elde edilir. Bunu m sayıda uydu için belli bir epok için yazdığımızda:

$$\sum_{k=1}^m Y_{ei}(2\% < \&-2np/X) - m \cdot e^{-i2\hat{i}f5} \quad (18)$$

bulunur. Birden fazla epok düşünül-
düğünde zamanla değişim gösteren saat
hatası 8 hesaba katılmalıdır. (17)
eşitliğindeki e^{-1} nin birim vektör
olarak gösterildiği hatırlanırsa, diğer bir
ifadeyle $e^{-1} = 1$ olduğu gözönüne
alınırsa (18) bağıntısı şu hale gelir:

$$\sum_{k=1}^m g_{ei}(2 \cdot O - 2irp/A,) = m \cdot 1 \quad (19)$$

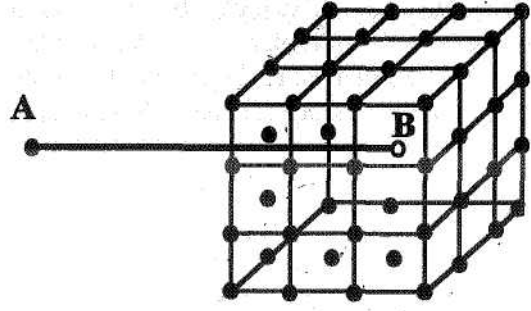
Böylece saat hatası kaybolur.

Ölçme ve model hatalarının olmadığı
ve A, B noktalarının koordinatlarının
hatasız olduğu ve dört uydunun olduğu
bir durumu örnek olarak ele aldığımızda,
eşitliğin sol tarafındaki O 'nin ölçülen
fazların tekli-farkları ve p 'nun da bilinen
noktalardan ve uydu konumlarından
hesaplanabildiği durumda elimize mak-
simum 4 sonucu geçecektir. Ancak B
noktası hatasız kabul edilmeyip hatalı
seçilirse eşitliğin sonucu 4'ten küçük
olmak zorundadır. Zaten gerçekte bu
maksimuma ölçme hataları ve eksik
modeller yüzünden büyük olasılıkla tam
olarak ulaşılamayabilir. Böylece işlem,
değişken B ile (19) eşitliğinin
maksimumunu elde etmeyle sınırlanır.

Yüksek duyarlıklı alıcı saatleri ve kısa
epok aralıkları olarak mutlak değer içinde
birden fazla epok almak teorik olarak
mümkündür, n sayıda epok kullanarak,
tüm epokların etkisi şu şekilde
toplanabilir:

$$\sum_{t=1}^n \sum_{k=1}^m j; k_e i(2^{\wedge} 2 \ll ^{\wedge}) = m \cdot n \quad (20)$$

Burada basitleştirmek amacıyla tüm
epoklarda aynı sayıda uydu olduğu
varsayılmıştır. [Remondi, 1984 ve 1990]
, (20) eşitliğinin sol tarafını (çift toplam
ifadesi) bir Belirsizlik Fonksiyonu (BF)
olarak adlandırmaktadır. Tek epoklu
duruma benzer olarak, BF'nin mak-
simumu bulunmalıdır. Önceden
belirtildiği gibi genel olarak bu değer m x
n değerinden daha küçük olacaktır.



Şekil 1 : Arama yöntemi

Şekil 1 : Arama yöntemi

Belirsizlik fonksiyonunun tamsayı
belirsizliklerinin çözümünde kullanımı
fonksiyonun kendisi kadar karmaşık
değildir. B noktasının yaklaşık çözümü,
örneğin, üçlü-farklardan elde edilmiş
olsun. Bu çözüm bir küpün merkezine
yerleştirilir (bkz. Şekil 1) ve küp kareler
ağı noktalarına bölünür. Her bir kareler
ağı noktası sonuç çözüm için bir adaydır
ve (20) bağıntısındaki BF tüm tekli-

farklar için hesaplanır. Teorik olarak toplam tekli-farklar sayısına ($m \times n$) eşit olması gereken maksimum BF değerini veren kareler ağı noktası bize aradığımız çözümü verecektir. Bu çözüm bulunduğundan sonra, belirsizlikler çiftli-farklar kullanılarak hesaplanabilir. Bununla birlikte, çiftli-farklardan yararlanılan bir dengeleme, B noktasının konumunu ve belirsizlikleri gerçeklemek²³ için yapılabilir. Sabitlenmiş belirsizliklerle noktanın hesaplanması ise son aşamayı oluşturur.

BF faz sıçramalarına tamamen duyarsızdır. Belirsizlik rastgele bir tamsayı AN kadar değişse bile $e^{i2\pi(N+AN)}$ M_m W_r birim vektör olmakta ve dolayısıyla bundan sonra gelen eşitlikler değişmeden kullanılabilir. Diğer yöntemlerde belirsizlik hesaplanmaya başlamadan önce faz sıçramalarının düzeltilmesi gerekmektedir.

5.2.2 En Küçük Karelerle Belirsizlik Arama Yöntemi

En küçük karelerle belirsizlik arama yönteminin uygulanabilmesi için yaklaşık konumun bir şekilde (genellikle kod uzunluk çözümünden) elde edilmesi gerekmektedir. Yöntemin temel ilkelerinden biri, uyduları bir ana ve bir de ikinci gruba ayırmaktır. Ana grup iyi bir DOP'a sahip dört uydudan oluşup bunlarla olası belirsizlik kümeleri belirlenir. İkinci grup uydular ise olası belirsizlik kümesindeki aday çözümleri azaltmada kullanılır.

Olası çözümler kümesi olarak basitleştirilmiş çiftli-fark modeli için (2) eşitliği ele alınır. Belirsizlikler bilinen

kabul edilip eşitliğin sol tarafına alınırsa model şu hale gelir:

$$XAO - N = p \quad (21)$$

Dört uydu için bu biçimde üç denklem kurulabilir. Eşitliğin sağında bulunan p doğrusallaştırılarak²⁴ ve 3×3 'lük katsayılar matrisinin tersi alınarak durak noktasının üç bilinmeyen koordinatı hesaplanabilir. Katsayılar matrisinin tersi değişmeden kalarak eşitliğin solundaki üç belirsizliğin değiştirilmesiyle yeni konuma ilişkin çözümler bulunur. Üç belirsizliğin değişimine bağlı olarak olası çözümler kümesi elde edilir. [Hatch, 1990] burada çiftli-farklar yerine her türlü hatadan kaçınmak amacıyla farkı alınmamış fazları kullanmaktadır.

Yukarıda da söz edildiği üzere; doğru olmayan çözümler, ikinci grup uydular gözönüne alınarak olası çözümler kümesinden ardışık en küçük kareler dengelemesi²⁵ kullanılarak atılır. Burada son adım olarak, çözümün nitelik göstergesi için ölçüt olarak KHT alınabilir. Kuramsal olarak geriye sadece gerçek belirsizlik kümesi kalmalıdır; fakat bu elde edilemiyorsa daha önce belirtildiği üzere KHT'ye bakarak çözüm seçilmelidir.

5.2.3 Hızlı Belirsizlik Çözümü Yaklaşımı

Hızlı belirsizlik çözümü yaklaşımının (FARA: Fast Ambiguity Resoluion Approach) gelişimi [Frei ve Beutler, 1989], [Frei, 1991]'de verilmiştir. [Ericson, 1992] FARA algoritmasını dört aşamaya ayırmaktadır: 1) Gerçek değer

²³

gerçeklemek: confirm

²⁴

doğrusallaştırmak: linearization ardışık en küçük kareler dengelemesi: sequential least squares adjustment

faz çözümünün hesaplanması, 2) test edilecek belirsizlik kümelerinin seçilmesi, 3) her belirsizlik kümesi için bir sabitlenmiş çözümün hesaplanması ve 4) en küçük varyansı olan sabitlenmiş çözümün istatistiksel olarak test edilmesi.

1) Çiftli-fark belirsizlikleri için gerçel değerler, bilinmeyen parametrelerin kofaktör matrisini ve birim ağırlığın soncul varyansını da hesaplayan bir dengeleme işlemiyle faz ölçmelerine dayalı olarak kestirilirler. Böylece bilinmeyen para-metrelerin varyans-kovaryans matrisi ve belirsizliklerin standart sapmaları da hesaplanabilir.

2) Araştırılması gereken belirsizlik aralıklarına ilişkin ölçütler, belirsizliklerin gerçel değerlerinin güven aralıklarına dayandırılır. Bu nedenle ilk aşamadaki başlangıç çözümün niteliği olası belirsizlik aralıklarını etkiler. Daha başka bir ifadeyle, a_N ile belirsizlik N'nin standart sapmasını gösterirsek, $+ CCT_N$ de bu belirsizliğin arama aralığı olur; buradaki c Student dağılımından istatistiksel olarak türetilir. Olası belirsizlik kümelerinin seçimine ilişkin ilk ölçüt böylelikle belirlenmiş olmaktadır.

İkinci bir ölçüt ise belirsizlik korelasyonunun kullanılmasıdır. Çiftli fark belirsizliklerinin N_a ve N_b olduğunu varsayarsak bunların farkı $N_{ab} = N_b - N_a$ 'nın standart sapması hata yayılma yasasından şu şekilde bulunur:

$$\sigma_{ab} = (\sigma_a^2 - 2c_{ab}\sigma_a\sigma_b + \sigma_b^2)^{1/2} \quad (22)$$

Buradaki c_{ab} , σ_a ve σ_b parametreleri varyans-kovaryans matrisinde bulunmaktadır. Belirsizlik farkı N_{ab} için arama aralığı $c_{ab} < 7_{ab}$ olmaktadır; buradaki c_{ab} , her çiftli-fark

belirsizlikleri için arama aralığı anlamına gelmektedir. Bu ölçüt olası tamsayı kümesi sayışım büyük ölçüde azaltmaktadır. Bunun üstünde bir azaltma da çift frekanslı faz ölçmelerinin kullanılmasıyla gerçekleştirebilir (bkz: Frei ve Schubernigg, 1992).

3) Dengelenmiş baz bileşenlerini ve soncul varyans faktörlerini veren ve istatistiksel olarak kabul edilmiş her belirsizlik kümesi için sabitlenmiş belirsizliklerle en küçük kareler dengelemesi yapılır.

4) Bu son aşamada en küçük soncul varyans çözümü bir kere daha irdelenir. Bu çözümün baz bileşenleri taşan çözüm ile karşılaştırılır ve çözüm uyumluysa kabul edilir. χ^2 dağılımı, soncul varyansın öncül varyansla uyumunu test etmede kullanılabilir. Bununla birlikte; Fisher testi de, en küçük ikinci varyanslı çözümün en küçük varyansa sahip çözümden daha iyi sonuç üretip üretmediğini araştırmada kullanılabilir. Ne var ki, bu iki varyansın birbirinden bağımsız olmadığı da bilmen bir gerçektir (Teunissen, 1996).

Şu ana kadar tanımlanan arama tekniklerinde arama, belirsizlik üzerinde gerçekleştirildi. Bundan farklı bir yaklaşım olarak, konumu bilinen olarak alıp belirsizlikleri bilinmeyen olarak çözmek mümkündür. Belirsizlikler üçlü-farklar oluşturularak ortadan kaldırılır, konumun ilk kestirimleri ve standart sapması o bir dengelemeyle elde edilir. Her koordinat doğrultusunda $\pm 3G$ boyutundaki bir kübün içine yaklaşık konum mer-kezlendirilir ve küp düz kareler ağına bölünür (bkz: Şekil 1). Böylelikle küp, merkez noktası üçlü-fark çözümü olan noktaların bir matrisini

içerecektir. Her kareler ağı noktası doğru çözüm için bir aday olarak gözönüne alınır. Hemen ardından, teker teker her aday konum, gözlem eşitliğinde yerine konur ve dengeleme yapılır, belirsizlikler hesaplanır. Küp içindeki tüm noktalar ele alınarak belirsizliklerin kestirilen gerçel değerleri mümkün olduğunca tamsayı değerlere yakın olan çözüm seçilir. Bunun ardından belirsizlikler bu tamsayı değerlere sabitlenir ve belirsizlikleri değiştirmeden kübün kareler ağı noktasına karşılık gelen değerinden genellikle çok az farklı olacağı son konum hesaplanır.

5.2.4 Hızlı Belirsizlik Arama Filtresi

Hızlı belirsizlik arama filtresi (FASF: Fast Ambiguity Search Filter) algoritması temel olarak üç aşamadan oluşur: 1) Gözlem işlevi gören durum vektörünü tahmin etmek için Kalman filtresi kullanılır, 2) aramaya belirsizlikler sabitleninceye kadar her epokta devam edilir ve 3) belirsizlik arama aralıkları iteratif olarak hesaplanır ve birbirine ilintilenir (Chen, 1994).

Başlangıç epokundan mevcut epoka kadar olan bilgiler Kalman filtresi kullanılarak hesaba katılır. Sabitlenemediklerinde gerçel sayılar olarak kestirilen belirsizlikler de Kalman filtresinin durum vektörünün içinde yer alır ve belirsizlikler sabitlendikten sonra durum vektörü değiştirilir. Bu durum vektörü bir gözlem olarak düşünülür ve diğer gözlemlerle birlikte katsayılar matrisi oluşturulur.

İteratif olarak belirlenen arama aralıklarının tespitinde öncül geometrik bilgiler ve diğer sabitlenmiş belirsizliklerin etkileri önemli rol oynar. Bunu daha iyi biçimde, dört çiftli-fark

belirsizliklerini ele alarak açıklayabiliriz. Birinci belirsizlik, diğer belirsizlikler sabitlenmeden hesaplanır. İkinci belirsizliğin arama aralığı, ilk belirsizliğin bilinen bir tamsayı değer olarak alınmasıyla hesaplanır; hatta bu yanlış bir tamsayı olsa bile. Üçüncü belirsizliğin arama aralığı, birinci ve ikinci belirsizliklerin tamsayı değerler olarak alınmasıyla hesaplanır ve bu işlem dördüncü belirsizlik için de yapılır. Bu yaklaşıma "arama aralığının iteratif hesaplanması" denilmektedir (Chen ve Lachapelle, 1994). Bu iteratif hesaplama, bilgisayar programlarında kullanılan iç-içe döngülere benzemektedir. Dört belirsizliğin ele alındığı durum için, dört iç-içe döngü gerekmektedir: İlk belirsizliğin döngüsü en-dış değer ve dördüncü belirsizliğin döngüsü de en-iç döngüdür. En-dış döngü dışındaki döngü aralıkları, dış döngü indislerine karşılık gelen değerlere dayanılarak hesaplanır. Böylece, örneğin, ikinci döngünün arama aralığı, birinci (en-dış) döngü indisine karşılık gelen belirsizlik değeri kullanılarak saptanır.

Belirsizlikler uygun olarak sabitlendikten sonra, Kalman filtresinin durum vektöründen, diğer bir deyişle kestirimden, atılırlar ve buna karşılık gelen gözlem eşitliği tekrar düzenlenir.

Parametre azaltması uygulanarak en küçük kareler yaklaşımıyla belirsizliklerin döngü aralıkları hesaplanır. Burada ilkin; çiftli-farklar üzerine kurulu modelin geride kalan parametreleri sadece belirsizlikler olabilsin diye, nokta koordinatlarına karşılık gelen parametreler normal denklemlerden çıkartılırlar. Ayrıca belirsizliklerle ilgili döngüler üzerine önceden yapılan irdelemeye göre; dış döngülerin

belirsizlikleri, yanlış değerleri ifade etseler bile tamsayılar olarak alınır. Dört belirsizlikli durumumuza dönersek, üçüncü belirsizliğin aralığının bulunması gerektiğinde, birinci ve ikinci belirsizlik bilinen kabul edilip koşullar²⁶ olarak tanıtılır; bu da zaten kestirim vektöründen atmakla aynı şeydir. Bu parametre azaltımının sonucu olarak, ilgili belirsizliğin ve varyansının taşın kestirimi elde edilir. Varyansı bir ölçek faktörüyle çarpıp bu değeri taşın çözümden çıkartma ve toplama da ilgili belirsizlik için olan arama aralığını verir. Bu yöntemde belirsizlik aralıkları yanlış hesaplanırsa doğru belirsizlik kümesi buluna-mamaktadır.

5.2.5 Özel Koşullarla Belirsizlik Çözümü

Kinematik uygulamalar için birden fazla alıcının kullanıldığı durumlar için bir kaç yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerdeki genel tema, gezici cismin sabit olduğu yerlere iki ya da daha fazla alıcı yerleştirmektir. Antenlerin konumları sabit olduğundan, iki anten arasındaki mesafe gibi koşullar, belirsizlik çözümünün etkinliğini artırmada yararlanılacak biçimde formüle edilebilir. Burada koşulların kullanımıyla olası belirsizlik kümelerinin azaltılması amaçlanmaktadır.

Bunu bir örnekle daha iyi açıklayabiliriz. Dört uydu ile üç tane çiftli-fark denklemi elde edebiliriz. Önceden tanımladığımız en küçük karelerle belirsizlik arama yöntemindeki işleme benzer olarak eşitlikler, (21) bağıntısına göre tekrar formüle edilirler. Çiftli-fark belirsizlikleri N'nin

tanımlanması, olası belirsizlik çözümleri kümesinin aranması suretiyle yapılır. En dar anlamıyla arama aralığının tanımlanması, baz uzunluğunu kullanılan taşıyıcının dalga boyuna (örneğin, L için 19 cm) bölerek gerçekleştirilebilir ve bu da bize devir sayısını²⁷ verecektir. Bu devir sayısının bir pozitif ve bir de negatif değerleri alınarak ve her belirsizlik için düşünülerek arama aralığı tanımlanır.

Arama külfetini azaltacak bir çok yöntem mevcuttur. Bunlardan biri, belirlenmesi istenen baz -üzerinde iki anten hizasında üçüncü bir antenin, antenlerden birine bir taşıyıcı dalga boyundan daha kısa mesafeye yerleştirilmesidir. Birbirine yakın iki antenin çiftli-fark belirsizlikleri yok olacağından geride kalan baz için gereken arama aralığı azaltılmış olacaktır (Jurgens vd., 1991).

Diğer bir arama aralığını azaltmaya yönelik yöntem de bilinen baz uzunluğu kullanmaktır. (21) eşitliğine dönersek, üç tane çiftli-fark gözönüne alınmakta ve p 'nun doğrusallaştırılması bazın referans durağına göre yapılmaktadır. Doğrusallaştırılmış sistem şu şekilde yazılabilmektedir:

$$i = M \quad (23)$$

Burada A matrisi doğrusallaştırma sonucunda elde edilen 3×3 'lük katsayılar matrisidir, x de bilinmeyen baz bileşenlerini içermektedir ve / ise artık hata vektörüdür. Baz uzunluğu koşulunu b ile gösterirsek, şu şekilde elde edebiliriz:

^{n/r} koşul: constraint

$$x = A^{-1}l \rightarrow$$

$$b^2 = x^T x = l^T (AA^T)^{-1} l \quad (24)$$

Bu sistem, A matrisini alt üçgen matrisi haline getiren sayısal çözümlemedeki Cholesky yöntemini $A A^T$ 'ya uygulayarak daha basit hale getirilebilir. Cholesky yönteminin sağladığı diğer kolaylık da, üçüncü belirsizliğin diğer iki belirsizlik cinsinden karesel bir eşitlikle ifade edilebilmesidir. Böylelikle iki belirsizliğin çözümü kendiliğinden üçüncü belirsizliğin çözümünü de getireceğinden arama aralığının büyüklüğü küçülmüş olacaktır.

6. SONUÇ

GPS'te çok önemli bir yer tutan, gerek konu ve gerekse etkilerinin boyutu bakımından oldukça karmaşık görünüm arzeden tamsayı belirsizliğini çözmek amacıyla bilim adamları tarafından bir çok yöntem önerilmiştir. Bu makalede konuya açıklık getirilerek anlaşılmasını kolay-laştırmak amacıyla çeşitli yöntemler basitleştirilerek özetlenmiş olup, daha ayrıntılı bilgi için makalenin sonunda verilen kaynaklar önerilmektedir. Tamsayı belirsizliklerinin çözümü için bu yöntemlerin seçiminde, yapılan işin kapsamına uygun olmak koşuluyla kullanıcının tercihi de önemli rol oynamaktadır.

Faz kombinasyonlarıyla belirsizlik çözümü, uygulamacılar ve yazılımcılar tarafından en çok kullanılan, geliştirilen ve değişik kombinasyon türleri türetilen belirsizlik çözüm yöntemidir. Bu yöntemde diğer yöntemlere kıyasla, belirsizliklerin yapısıyla ilgilenme daha az olup, sinyallerin yapısal ve matematiksel özellikleri irdelenerek belirsizliklerin

çözümü yapılmaktadır. Uzun bazlarda geniş-dalga doğrusal kombinasyonu ve kısa bazlarda da dar-dalga doğrusal kombinasyonu tercih edilebilirken, iyonosferin etkisi yine başka bir faz kombinasyonu ile giderilebilmektedir. Bunların ayrı ayrı kullanımları veya birlikte uygulanmalarında öncelik sırası kullanıcının amacına, deneyimine ve tercihinin bırakılmaktadır; örnek bir faz kombinasyonlarıyla tamsayı belirsizliği çözüm stratejisi için [Mekik, 1996] ve [Mekik, 1998] önerilir.

Geometrik belirsizlik çözüm yöntemi iyi bir geometri, dolayısıyla uzun ölçme süreleri gerektirdiğinden kinematik ve kısa süreli statik ölçmeler için uygun olmamakta; troposfer, iyonosfer ve uydu yörüngesinden kaynaklanan modellenmemiş sistematik hataların ölçmelerden çıkartılamaması durumunda, istenilen düzeyde nitelikli sonuçlar elde edilememektedir. Bununla birlikte, kısa bazlarda uzun ölçme oturumlarıyla az zamanda çok iyi çözümlere ulaşılabilmektedir.

Faz ve kod verilerinin kombinasyonu, kod uzunluklarının tamsayı belirsizliği içermemesi temel ilkesinden yararlanarak faz ön-uzunluk ölçmeleriyle birleştirilmesi sonucunda, belirsizlikleri etkili bir biçimde çözen bir yöntemdir. Bununla beraber yine aynı yapısından dolayı, kod ölçmelerini olumsuz etkileyen doğruluk yoksutlanandan²⁸ (Seçici Geçerlik [SA]²⁹ ve Benzetime-Karşı [A-S]³⁰) etkile-nemilmektedir. Baz uzunluğu etkisinden ve iyonosferik etkilerden arınmış olduk-larından tercih edilmelerine

doğruluk yoksutu : denial of accuracy

29

Seçici Geçerlik : Selective Availability (SA)

Benzetime-Karşı: Anti-Spoofing (A-S)

karşın, çokyolluluk faz ve kodu farklı etkilediği için bundan kaçınmak amacıyla ölçmelerin uzun bir süreç için ortalamasının alınması gerekmektedir.

Arama yöntemleri ölçme yapılan noktadaki oturum sürelerini kısaltmak için geliştirildiklerinden duyarlılık bozunum değeri düşük olan gözlemler, diğer bir deyişle alıcı antenin görünümündeki uydu sayısının çok ve bu uyduların geometrik olarak iyi bir dağılımı sergilemeleri gerekmektedir. Arama ile belirsizliklerin çözüm yöntemleri, GPS bilimi ve teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak, özellikle kinematik ve anlık ölçmelerin kullanımının artmasıyla, sürekli olarak gelişmekte ve her geçen gün yeni bir yöntem ortaya çıkmaktadır. Ancak, genellikle bu yeni yöntemler temelde ve mantık olarak benzerlik gösterdiklerinden bu makalede esas teşkil eden yöntemler sunulmuştur.

KAYNAKLAR

Cammooij, M.E., Lachapelle, G. (1993) : "GPS-theory and applications." Lecture Notes for a seminar on GPS given at Gratz, Austria.

Chen, D. (1994) : "Development of a fast ambiguity search filtering (FASF) method for GPS carrier phase ambiguity resolution." Reports of the Department of Geometrics Engineering of the University of Calgary, vol.20071.

Chen, D. ve Lacfaapele, G. (1994) : "A comparison of the FASF and least-squares search algorithms for ambiguity resolution on the fly." in: Proc. of Int. Symp. on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and

Navigation, Banff, Canada, August 30-Sept2, pp.241-253.

Coînselmaii, C.C. ve Goiirevitch, S.A. (1981) : "Miniature interferometer terminals for earth surveying: ambiguity and multipath with GPS." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-19(4), pp.244-252.

Ericson, C. (1992) : "An analysis of ambiguity resolution techniques for rapid static GPS surveys using single frequency data." in: Proc. of ION GPS-92, 5th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the Inst. of Nav, Albuquerque, New Mexico, Sept. 16-18, pp.453-462.

Frei, E. (1991) : "GPS- Fast Ambiguity Resolution Approach 'FARA' : theory and application." in: XX General Assembly of IUGG, IAG-Symp. GM 1/4, Vienna, August 11-24.

Frei, E. ve Belitler, G (1989) : "Some considerations concerning an adaptive, optimized technique to resolve the initial phase ambiguities for static and kinematic GPS surveying techniques." in: Proc. of the 5th Int. Geodetic Symp. on Sat. Pos., Las Cruces, New Mexico, March 13-17, vol.2, pp.671-686.

Frei, E. ve Sciraberaigg, M. (1992) : "GPS surveying techniques using the 'Fast Ambiguity Resolution Approach (FARA)." in: the 34th Australian Surveyors Congress and the 18th National Surveying Conference at Cairns, Australia, May 23-29.