



TETRA baz istasyonları arasında frekans planlaması

Frequency plannig between TETRA base stations

Şakir Yılmaz^{1,*}, Çağatay Aydın², Doğu Çağdaş Atilla³

^{1,3} Altınbaş Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34100, İstanbul Türkiye
² Ege Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 35100, İzmir Türkiye

Öz

Günümüzde kısıtlı frekans kaynaklarının tekrarlanarak kullanılması frekans planlama açısından ciddi önem arz etmektedir. Özellikle kritik ses haberleşmesinde daha az baz istasyonu ile daha fazla alan kapsanmak istendiğinde frekans tekrarı sorunu daha çok göze batmaktadır. Bu makalede kritik ses haberleşmesi teknolojilerinden olan Karasal Trunk Telsiz sistemi (Terrestrial Trunk Radio, TETRA) üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Baz istasyonları konumları, yayın yaptığı frekans bilgisi, baz istasyonu çıkış gücü, sisteme ait bant genişliği göz önüne alınarak komşu kanal ve ortak kanal girişimleri incelenmiştir. Sayısal telsiz sisteminde mevcut hesapların yetersiz kaldığı ve bu hesaplara ek olarak komşuluk ilişkilerinin de frekans planlamada önemli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca konuşma trafiği yoğunluğu (Erlang) incelenerek sistemde işlevsiz kullanılan frekanslar tespit edilmeye çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: TETRA, Frekans planlama, Frekans tekrarı frekans atama, İnterferans

1 Giriş

Frekans planlama ihtiyacı ilk olarak kablosuz haberleşme sistemlerinin artması ile ortaya çıkmıştır. Farklı sistemlerin (TV, radyo, GSM vb.) kullanmış olduğu frekansların birbirini etkilemesi ile haberleşme kalitesinin düştüğü tespit edilmiştir. Bu sebeple bu sorunu çözüme kavuşturacak farklı yöntemler ortaya atılmıştır. Bu çözümler daha çok sorunun ana kaynağı olan girişim problemi üzerine kurgulanmıştır. [1, 2]

Frekans planlama sorunu için üretilen ilk çözüm her sistem için belirli frekans aralığı tahsis edilmesi şeklinde olmuştur. [3] Fakat kablosuz haberleşme yapan ekipmanların yaygınlaşması ile birlikte frekans kaynağı tükenme noktasına gelmiştir. İşte bu noktada mevcut frekansları iyi bir planlama ile farklı bölgelerde tekrar kullanma (frequency reuse) gündeme gelmiştir. [1]

Frekans planlama probleminin çözümünü karmaşık duruma getiren en önemli faktörler, baz istasyonlarının konumlandığı bölge, kullanılan anten türü ve kapsama sağlayabilmek adına baz istasyonlarının sağladığı çıkış güçleridir. [4]

Bu makalede TETRA standartları ve uygulama yapılan TETRA sisteminin çalışma mantığı dikkate alınarak konuşma trafiği yoğunluğu (Erlang), girişim (interferans) olayı ve sistemdeki komşuluk ilişkileri incelenecektir. Elde

Abstract

Frequency reuse is necessary for wireless communications due to limited frequency. Especially, mission critical communication users usually want to communicate in a wide area with minimum number of base stations. This request increases the frequency demand and this problem could be solved by RF optimization and frequency planning in order to reuse frequencies. This paper suggests a frequency plan to a TETRA system by analyzing traffic load, interference and using neighborhood between base stations.

Keywords: TETRA, Frequency planning, Frequency reuse, adjacent and co channel interference

edilen veriler ışığında mevcut frekanslar ile uygulama yapılan sistemde kullanılan baz istasyonlarına uygun frekans ataması yapılacaktır

2 Materyal ve metod

2.1 TETRA sistemine genel bakış

İlk olarak 1997 yılında görülen TETRA sistemi, acil durumlarda haberleşme ihtiyacını gidermek için tasarlanmıştır. ETSI tarafından belirlenen frekansları kullanarak sabit 25 Khz band genişliğinde haberleşme sağlamaktadır. TETRA için tahsis edilen 25 Khz band genişliğindeki her bir frekans zaman bölmeli çoğullama (TDMA) tekniği ile dört zaman dilimine (time-slot) bölünmüştür. Bu sayede tek bir frekans üzerinden aynı anda dört farklı ses/veri trafiği aktarımı sağlanmaktadır. [5]

TETRA sistemi temel olarak anahtarlama ve yönetim merkezi (SwMI, switching and management infrastructure), bu merkeze bağlı baz istasyonları ve son kullanıcıya tahsis edilen telsiz ekipmanlarından oluşmaktadır. SwMI, baz istasyonlarına ait bilgiler ile abonelere ait kullanıcı kimlik (ISSI) ve grup kimlik (GSSI) bilgilerini yönetmektedir. SwMI aynı zamanda baz istasyonlarını birbirine bağladığı için geniş alan kapsamında önemli rol almaktadır.

TETRA baz istasyonu anahtarlama merkezinden aldığı frekans bilgisine göre aşağı bağlantı (downlink) kanalından

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: geniusx31@yahoo.com (Ş. Yılmaz)

Geliş / Recieved: 02.11.2021 Kabul / Accepted: 12.02.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1017751

yayın yapmaktadır. Baz istasyonuna bağlanmak isteyen bir telsiz öncelikle aldığı frekansa göre kendi yukarı bağlantı (uplink) frekansını ayarlayarak baz istasyonuna istek gönderir. Baz istasyonu telsizin gönderdiği bu isteği anahtarlama merkezine sorarak abone bilgilerini alır. İstek gönderen telsiz sisteme kayıtlı ise telsizin isteği kabul edilerek telsize baz istasyonunda kanal ataması yapılır. Baz istasyonuna bağlanan telsize hücre kimlik bilgisi (location area - LA), komşu baz istasyonları bilgisi ile baz istasyonları arası geçiş (handover) için gerekli parametre bilgileri gönderilir. Telsiz bağlandığı baz istasyonuna ait sinyal haricinde algıladığı sinyalleri kendisine gelen LA bilgileri ile eşleştirir. Telsize ulaşan sinyal baz istasyonunda ayarlı erişim seviyesinden (RxA) daha düşük ise telsiz farklı bir baz istasyonu ile bağlantı kurmak için listesindeki frekansları tarar. [6].

2.2 Frekans planlama kriterleri

Bu çalışmada frekans planlama için konuşma trafiği yoğunluğu ve frekanslar arası girişim olmak üzere iki temel kriter göz önüne alınmıştır. Uygulama yapılan sisteme ait baz istasyonları dağılımı ve bu baz istasyonlarına ait LA numaraları Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Uygulama yapılan sisteme ait baz istasyonu dağılımı

2.2.1 Konuşma trafiği yoğunluğu

Konuşma trafiği yoğunluğu bir baz istasyonundaki ortalama kanal ihtiyacını belirlemektedir. TETRA sisteminde her 4 kanal bir adet frekansa karşılık geldiğinden ortalama kanal ihtiyacı bir baz istasyonuna atanacak frekans sayısını belirlemektedir.

Bu çalışmada kullanılan sistemdeki 10 adet baz istasyonu 8 kanal, bir adet baz istasyonu ise 4 kanal yapısı kullanılmaktadır. Konuşma trafiğinin az olduğu bölgelerde 8 kanal yerine 4 kanal yapısına geçmek frekans tekrarı yapılması hususunda ciddi avantaj sağlayacaktır.

Konuşma trafiği yoğunluğunu hesaplamak için Erlang formülü kullanılmaktadır. Literatürde Erlang B ve Erlang C olmak üzere bilinen 2 adet Erlang formülü vardır. TETRA sistemi temelde çağrı bekleme servisi kullandığından dolayı TETRA sisteminde Denklem (1)’de gösterilen Erlang C formülü tercih edilmektedir. [7, 8]

$$P_0 = \frac{A^N}{A^N + \left[N! \left(\frac{N-A}{N} \right) \sum_{X=0}^{N-1} \frac{A^X}{X!} \right]} \quad (1)$$

A: Trafik Yoğunluğu (Erlang), N: Ortalama kanal sayısı, P₀: Çağrı bekleme olasılığı, X: Anlık kanal sayısı

Denklem (1) de belirtilen trafik yoğunluğu hesabı Denklem (2)’de gösterilen formül ile yapılmaktadır.

$$A = U\lambda Hn \quad (2)$$

U: Baz istasyonu başına kanal sayısı, λ: Yoğun saatlerde abone başına düşen çağrı talebi, H: Ortalama çağrı süresi, n: Bir grup çağrısı için kullanılan baz istasyonu sayısı

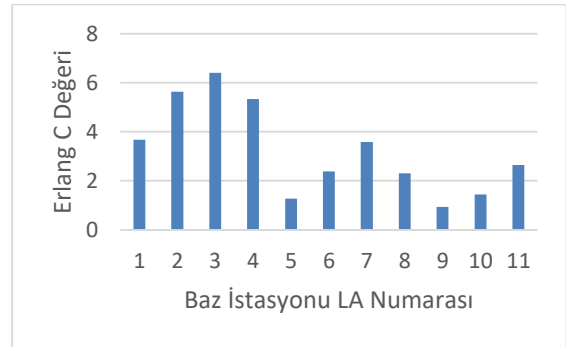
Normal çağrı bekleme süresinin aşılması durumunda çağrı bloke edilir. Bekletilen çağrıların çağrı bekleme süresi içinde kaynak atama olasılığı servis derecesi (GoS, Grade of Services) olarak tanımlanır ve P_T ile gösterilir. P_T, Denklem (3)’te gösterilen formül ile hesap edilmektedir.

$$P(W > T) = P_T = P_0 e^{\frac{(N-A)T}{H}} \quad (3)$$

W: İlk giren ilk çıkar (First in First out, FIFO) kuyruk modeline göre çağrı bekleme süresi, T: Kuyrukta bekleme süresi, N: Ortalama kanal sayısı, P₀: Çağrı bekleme olasılığı

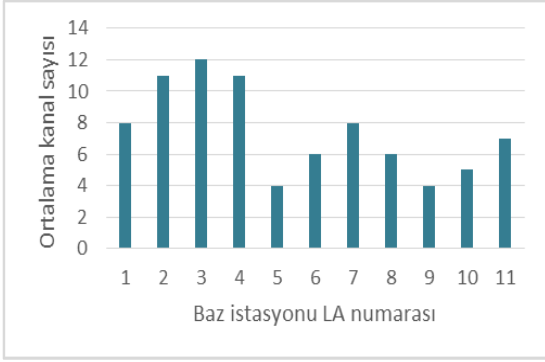
Tipik bir telsiz iletişim ağında GoS=%5 ve T=5 sn olarak kabul edilmektedir. [9]

Bu makale kapsamında uygulama yapılan sistemde 11 adet baz istasyonu bulunmaktadır. Bu baz istasyonlarının yoğun olarak kullanıldığı 3 güne ait 24 saatlik çağrı kayıtları Rohill firmasına ait detaylı çağrı kaydı (CDR, Call Detail Record) yazılımı üzerinden analiz edilmiştir. Şekil 2’de her bir baz istasyonu için yapılan analiz sonucu gösterilmiştir.



Şekil 2. Trafik yoğunluğu analiz sonucu

Erlang C tablosu üzerinden Şekil 2’deki veriler kullanılarak %5 GoS değerinde her bir baz istasyonu için ortalama kanal ihtiyacı Şekil 3’te gösterilen grafikte verilmiştir. Grafığe göre 5 ve 9 no.lu baz istasyonları haricinde kalan baz istasyonlarında mevcut kanal sayılarının azaltılamayacağı görülmektedir. Uygulama yapılan sistemde 5 no.lu baz istasyonu için kullanım oranının artacağı bildirilmiştir. Bu sebeple uygulama yapılan sistemde sadece 9 no.lu baz istasyonunda kanal azaltılabileceği görülmektedir.



Şekil 3. Trafik yoğunluğuna göre ortalama kanal sayısı

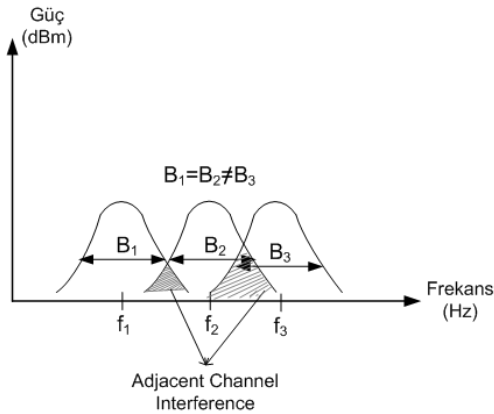
2.2.2 Girişim (Interferans)

Girişim mobil haberleşmede alıcı tarafında yaşanan bir sorun olarak ortaya çıkar. Genel ifade ile istenilmeyen bir sinyalin istenilen sinyali bozması olayıdır. Girişim, trafik kanalında arka plan gürültüsü ve bağımsız iki konuşma kanalı arasındaki konuşmaların birbiri üzerine binmesine; kontrol kanalında ise abonenin bağlantıyı kaybetmesine neden olur. [10]

Girişim olayı komşu kanal girişimi ve ortak kanal girişimi olmak üzere iki farklı bölümde incelenmektedir.

2.2.2.1 Komşu kanal girişimi (Adjacent channel interference)

Komşu kanal girişimi aynı ya da farklı bant genişliğine sahip olan ardışık iki frekansın birbirleri ile girişmesi olayıdır. Bu durum aslında Şekil 4'te de gösterildiği gibi uygulamada kullanılan filtrelerin ideal olmamasından kaynaklanmaktadır.

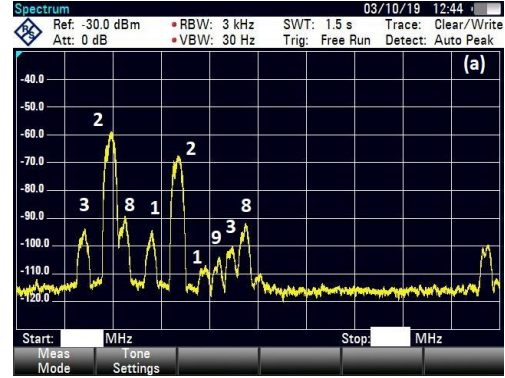


Şekil 4. Uygulamadaki Filtre Çıkışı

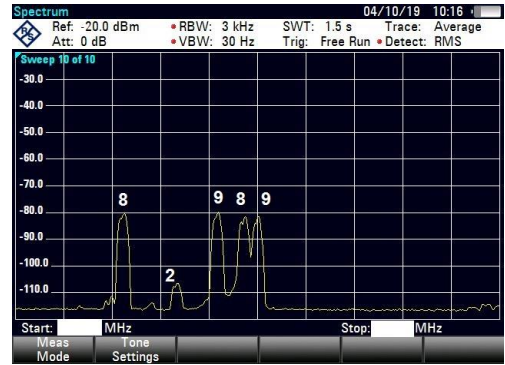
TETRA sisteminde girişime sebep olan komşu kanal gücünün servis alınan kanal gücünden en az 45 dB daha düşük olması durumunda komşu kanal girişimi etkileri iletişim açısından bir sorun oluşturmamaktadır [6]. Uygulama yapılan sistemde bu sınır değerinin daha çok direkt görüş açısı (Line of Sight, LoS) bölgelerinde sağlanamadığı görülmüştür. Bu sebeple bu makalede yapılan hesaplar LoS bölgelerine göre yapılmıştır.

Uygulama yapılan sistemde 1 ve 2 nolu bölgelerdeki LoS bölgelerinden alınan ölçüm sonuçları Şekil 5 ve 6' da

gösterilmiştir. Şekillerden de görüleceği üzere komşu kanal girişimi en fazla frekansların birbirine yakın olması ve konumu itibarıyla sinyal zayıflamasının az olduğu 8 ile 9 ve 2 ile 8 numaralı baz istasyonları arasında yaşanmaktadır.

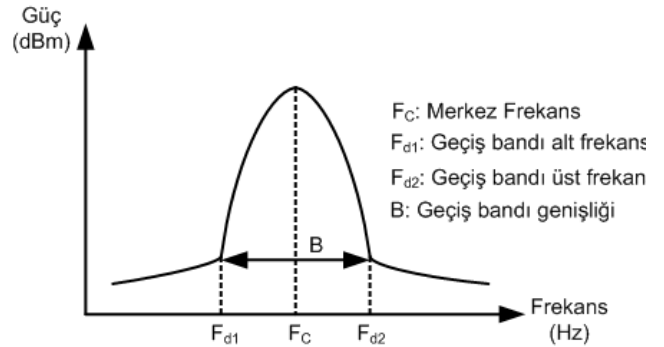


Şekil 5. 1. Bölge ardışık kanal girişimini gösteren örnek ölçüm



Şekil 6. 2. Bölge ardışık kanal girişimini gösteren örnek ölçüm

Komşu kanal girişimini engellemek için iki frekans arasında koruma bandı kullanılması tercih edilmektedir. Koruma bandı ataması yapılırken filtreye ait Şekil 7' de gösterilen geçiş bandı genişliğinin bilinmesi ve mobil haberleşmede doppler olayının incelenmesi gerekmektedir. [11, 12]



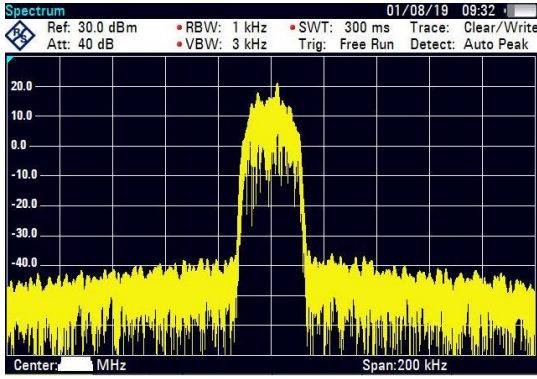
Şekil 7. Geçiş bandı genişliğinin gösterimi

Koruma bandı ataması yapılırken Şekil 7'de gösterilen geçiş bandı genişliğinin yarısı (B/2) 25 kHz ve üzerinde ise Denklem (4)'teki bağıntı kullanılır. (B/2)<25kHz için yayın

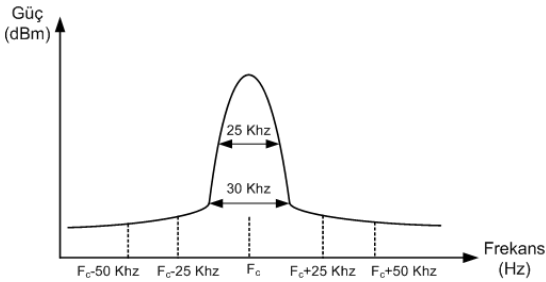
yapacak ardışık iki frekans arasına en az 25 kHz koruma bandı atanması tavsiye edilmektedir. [13]

$$\text{Koruma Bandı} = 2(F_{d2} - F_c) \quad (4)$$

Bu çalışmada kullanılan sisteme ait kavite filtrenin spektrum analizör ile ölçülen çıkışı Şekil 8 ve Şekil 9'de gösterilmiştir. Şekil 9'dan da görüleceği üzere sisteme ait filtre çıkışında $(B/2) < 25\text{kHz}$ olduğu için ardışık iki frekans arasına 25 kHz koruma bandı atanması uygun olacaktır. Bu sebeple frekans planında ardışık iki frekans arasına en az 50 kHz fark konulması gerekmektedir.



Şekil 8. Çalışma yapılan sistem ait filtrenin spektrum gösterimi



Şekil 9. Çalışma yapılan sisteme ait filtrenin grafiksel gösterimi

Koruma bandı atamasında önemli olan bir diğer nokta Doppler etkisidir. Doppler etkisinden kaynaklı frekans kaymasını hesap etmek için Denklem (5)'teki bağıntı kullanılmaktadır. [6]

$$f_d = v \frac{f_c}{c} \quad (5)$$

f_d : Doppler Frekansı, c : Işık Hızı, v : Mobil alıcı/verici hızı, f_c : Verici merkez frekansı

Bu makale kapsamında çalışma yapılan sistemde 410-430 MHz frekans bandı kullanılmakta olup mobil cihazların 90 km/sa hız ile hareket ettiği öngörülmektedir. Bu bilgiler ışığında Doppler frekans kayması 35 Hz civarında olmaktadır. Bu değer 25 kHz değerinden küçük olduğu için doppler olayı bu çalışmada ihmal edilmiştir.

2.2.2.2 Ortak kanal girişimi (Co-channel interference)

Aynı frekansın farklı iki baz istasyonunda kullanılması sebebi ile ortaya çıkan bu girişim türü frekans tekrarı probleminin ana nedenini oluşturmaktadır. GSM sektöründe bu sorun altı farklı şekilde modellenmiştir [14]. Her birine ait ayrı bir çözüm olmasına karşın bu makalede sadece çoklu girişim oluşturucu hücrelerle coğrafik modelleme (Geographical Model with Several Tiers of Interferers) kullanılmıştır.

Genel ifade ile frekans tekrar kullanım faktörü (cluster size) Denklem 6'da gösterilen bağıntı yardımı ile hesap edilmektedir [15].

$$N_R = \frac{1}{3} \left[MKA \left(\frac{C}{I} \right)_T \right]^{\frac{2}{\alpha}} \quad (6)$$

M: Uzun dönemli sönmüleme etkisi (Slow fading effect), K: Hücre geometrisi ve girişim oluşturan hücre sayısına bağlı etken, A: Aktivite etkeni, α : Yayılım sembolü, $(C/I)_T$: Kabul edilebilir girişim oranı

TETRA standartlarında;

$\alpha=3.5$, TU50 koşuluna göre, $K=7$, TU50 ve $\alpha=0.35$ koşuluna göre, $M= 6-12$ dB, %90 kapsama alanı koşuluna göre 8 dB, $(C/I)_T= 19$ dB, $A=1$

Tekrar kullanım faktörü aynı zamanda baz istasyonu kapsama yarıçapı ile ilgilidir. Tekrar kullanım faktörü Denklem (7)' de gösterilen bağıntı ile hesap edilmektedir. [15]

$$\frac{d}{r} = \sqrt{3N_R} \quad (7)$$

d : Tekrar kullanım için gerekli en kısa mesafe, r : Baz istasyonu kapsama yarıçapı

Bir baz istasyonu kapsama yarıçapını tespit edebilmek için telsizin aldığı en düşük sinyal seviyesinin baz istasyonundan ne kadar uzaklıkta olduğunu tespit etmek yeterli olacaktır. Bunun için Denklem (8)' deki bağıntı kullanılarak link bütçesi hesap edilmektedir.

$$R_x = T_x + G - (IL + L) \quad (8)$$

R_x : Alıcıya ulaşan güç, T_x : Baz istasyonu çıkış gücü, G : Anten Kazancı, IL : Insertion Loss (girişim kaybı), toplam, kablo ve konektör kayıplarını ifade eder, L : Yol Kaybı

Çalışma yapılan sistemde en fazla girişime maruz kalan 2 no.lu baz istasyonu olduğu için link bütçesinde referans olarak bu baz istasyonu seçilmiştir. 2 no.lu baz istasyonunda;

$R_xA = -95$ dB, $T_x + G - IL = 17$ dB olarak ayarlanmıştır. Denklem (8) üzerinden yol kaybı $L = 112$ dB olarak bulunmuştur.

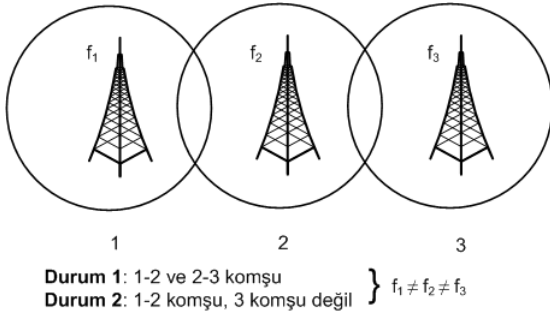
İzotropik antenlerden oluşan bir kapsama alanındaki LoS bölgelerinde yol kaybı hesap edilirken temel olarak Denklem (9)'daki serbest uzay kaybı formülü kullanılır [16].

$$L = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d) \quad (9)$$

f: MHz cinsinden verici frekansı, d: km cinsinden alıcı ile verici arasındaki mesafe, $f = 420$ MHz ve $L = 112$ dB için $d = 22.9$ km olarak bulunmaktadır.

Buradaki d değeri Denklem 6'daki r değerine karşılık gelmektedir. Denklem 5'ten N_R değeri TETRA standartlarına göre 17.88 olarak bulunmaktadır. N_R ve r değerleri Denklem 6'daki yerlerine yazıldığı zaman $d = 167.72$ km olarak hesap edilmektedir. Çalışma yapılan bölgede $d = 167.22$ km mesafeye ulaşamadığı için frekans tekrarı yapılamamaktadır.

Görüş ufku çizgisinde olmayan baz istasyonları için Şekil 10'da gösterilen durumların sağlandığı baz istasyonları arasında da frekans tekrarı yapılamamaktadır. Bu durum sistemde tanımlı komşuluk ilişkilerinden kaynaklanmakta olup telsiz aynı frekansı farklı komşu hücrelerde gördüğü zaman kararsız bir durum yaşamaktadır.



Şekil 10. Görüş ufkunda olmayan baz istasyonları için frekans tekrarı yapılamayacak durumların gösterimi

3 Bulgular ve tartışma

Çalışma yapılan sistemde 11 adet baz istasyonu olup bunlardan 4 tanesi yer altı 7 tanesi yer üstü kapsamayı sağlamaktadır. Bu baz istasyonlarına 410-430 MHz bandında ve her biri arasında 25 kHz fark olan F1-F17 frekansları arasından 14 tane frekans tahsis edilmiştir. F2, F3 ve F12 frekansları üst kurum tarafından sistemin sahibi olan kuruma tahsis edilmediği için F2, F3 ve F12 frekansları planlamada kullanılamamaktadır.

Tablo 1. Sistemde tanımlı komşuluk ilişkileri

BTS No	Komşu BTS No
1	2, 3, 4
2	1, 3, 6, 7
3	1, 2, 4, 11
4	1, 3, 5
5	4, 11
6	2, 7
7	2, 6
8	2, 9, 10
9	8, 10
10	8, 9
11	1, 2, 3, 5

Başlık 3 ve Tablo 1'deki bilgiler ışığında frekans planı şu şekilde yapılmıştır:

- 1, 2, 3, 6, 8 ve 9 no.lu baz istasyonları LoS bölgesinde olduğu için bu baz istasyonlarına ait frekanslar birbirinden farklı olmalıdır.

- 9 no.lu baz istasyonu için yapılan trafik analizinde tek taşıyıcı ile hizmet verebileceği tespit edilmiştir. Bu sebeple bu baz istasyonuna tek frekans ataması yapılmıştır.
- 9 no.lu baz istasyonu sinyalinin Avrupa yakasına daha düşük değerde ulaşması girişim olan bölge sayısını azaltacaktır. Bu sebeple 9 no.lu baz istasyonuna F17 frekansı tahsis edilmesi önerilmektedir.
- 8 no.lu baz istasyonu sinyalinin Avrupa yakasındaki kapsamayı etkilememesi için bu baz istasyonunda yönlü anten kullanılmıştır. Fakat kullanılan yönlü antenin ışın diyagramı Avrupa yakasına sinyalin geçmesine müsaade etmektedir. Bu durumun etkisini azaltmak için 9 no.lu baz istasyonu için tahsis edilen frekansa en az 50 kHz uzaklıktaki ve 9 no.lu baz istasyonuna ait frekanstan sonraki en yüksek frekans olan F13 - F15 frekanslarının tahsis edilmesi önerilmektedir.
- 6 no.lu baz istasyonun 2 ve 7 no.lu baz istasyonları ile komşuluk ilişkisi mevcuttur. Bu baz istasyonu ayrıca 11 no.lu baz istasyonu ile handover yapmaktadır. Bu sebeple 6 no.lu baz istasyonu LoS bölgelerinde bulunan baz istasyonları ile 7 no.lu ve 11 no.lu baz istasyonlarından farklı frekanslara sahip olmalıdır. Diğer yandan 4 ile 6 numaralı baz istasyonu birbiri ile etkileşim halindedir. Şekil 9'da gösterilen Durum-2 gereği 5 ve 6 no.lu baz istasyonlarına ait frekanslar normalde birbirinden farklı olmalıdır. Fakat bu etkileşim sadece bir bölgede olduğu ve bu sorun telsizlerde yapılan konfigürasyonla aşılabildiği için 5 ve 6 no.lu baz istasyonlarına aynı frekans tahsis edilmesinde bir sorun olmayacağı öngörülmüştür.
- 6 no.lu baz istasyonu frekansı LoS bölgesindeki 2, 8, ve 9 no.lu baz istasyonlarına ait frekanslardan en az 50 kHz uzaklıkta olmalıdır. Bu sebeple 6 no.lu baz istasyonu için F5 - F7 frekans çiftinin tahsis edilmesi önerilmiştir.
- 4 no.lu baz istasyonunun 1, 3 ve 5 no.lu baz istasyonları ile komşuluk ilişkisi mevcuttur. Bu baz istasyonu ayrıca Denklem 9'da gösterilen Durum 2'deki koşulları sağladığından bu baz istasyonuna ait frekans 2, 6, 8, 9 no.lu baz istasyonlarına ait frekanslardan farklı olmalıdır. Ayrıca bu baz istasyonu arada komşuluk ilişkisi olmamasına rağmen 11 no.lu baz istasyonu ile Type-1 handover yapmaktadır. Dolayısıyla 4 ve 11 no.lu baz istasyonları frekansları da birbirinden farklı olmalıdır.
- 4 no.lu baz istasyonu 2 ve 5 no.lu baz istasyonları ile etkileşim halinde olduğu için 4 no.lu baz istasyonuna F4, F6 ve F10 frekanslarının tahsis edilmesi tavsiye edilmemektedir. Bu sebeple 4 no.lu baz istasyonuna F14 - F16 frekans çiftinin tahsis edilmesinin uygun olacağı öngörülmüştür.
- 7 no.lu baz istasyonunun 2 ve 6 no.lu baz istasyonları ile komşuluk ilişkisi mevcuttur. 6 no.lu baz istasyonu ile olan komşuluk ilişkisinden dolayı Şekil 9'da gösterilen Durum-2'deki koşulları yaşamaktadır. Ayrıca bu baz istasyonu sinyali sadece bir bölgede LoS bölgesine girmektedir. Bu sebeple bu baz istasyonuna

atanacak frekans diğer baz istasyonlarından farklı olmalıdır.

- 7 no.lu baz istasyonu 2, 3, 8 ve 9 no.lu baz istasyonları ile etkileşim halindedir. Bu sebeple bu baz istasyonu için tahsis edilecek frekans LoS bölgesindeki diğer baz istasyonlarına tahsis edilen frekanslara en az 50 kHz uzaklıkta olmalıdır. 7 no.lu baz istasyonu için F4 – F6 frekanslarının tahsis edilmesi önerilmektedir.
- 10 no.lu baz istasyonu 7 no.lu baz istasyonu ile benzer koşulları sağladığı için 7 ve 10 no.lu baz istasyonlarına aynı frekansın tahsis edilmesi önerilmektedir.
- 11 no.lu baz istasyonu 1, 2, 3 ve 5 no.lu baz istasyonları ile komşu olduğu için ve aynı zamanda Şekil 9'daki Durum-2'de belirtilen koşulları da sağladığı için bu baz istasyonuna ait frekans diğer baz istasyonlarına ait frekanslardan farklı olmalıdır.
- 11 no.lu baz istasyonu bulunduğu metro hattının özelliğinden dolayı bu baz istasyonu sinyalinin daha az zayıflaması istenilmektedir. Bu sebeple 11 no.lu baz istasyonuna F1 frekansının tahsis edilmesi tavsiye edilmektedir.
- 2 no.lu baz istasyonu hem Anadolu yakasında hem de Avrupa yakasında en fazla etkileşim içinde olan baz istasyonudur. Bu sebeple bu baz istasyonuna ait sinyalin biraz zayıflaması için yüksek frekans tahsisi gerekmektedir. LoS bölgesindeki diğer baz istasyonlarına tahsis edilen frekanslardan 50 kHz uzaklıktaki ilk frekans çifti olan F9 – F11 frekansları bu baz istasyonuna tahsis edilmesi önerilmektedir.
- LoS bölgesindeki baz istasyonu sinyalleri ile etkileşim içinde olan 1 ve 3 no.lu baz istasyonlarına bir frekans tahsisi yapılamamıştır. Bu baz istasyonlarına tahsis edilecek frekanslar ya ortak kanal girişimine ya da komşu kanal girişimine neden olmaktadır.

Tablo 2. Frekans Planı

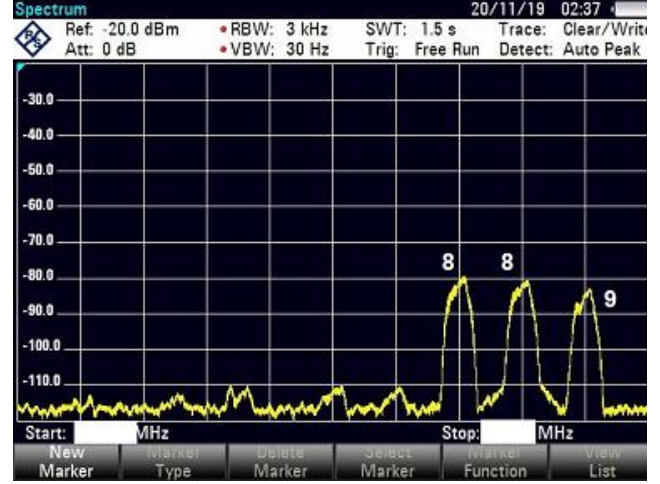
BTS No	Frekans No
1	-
2	F11, F9
3	-
4	F14, F16
5	F5, F7
6	F5, F7
7	F4, F6
8	F13, F15
9	F17
10	F4, F6
11	F1

Yapılan hesaplamalar neticesinde 410-430 MHz frekans bandı kullanan TETRA sisteminde görüş ufkunda haberleşme var ise ortak kanal girişiminin yaşanmaması için gerekli en kısa mesafe yaklaşık 167 km olarak belirlenmiştir. Görüş ufkunda olmayan baz istasyonları arasında frekans tekrarı yapabilmek için ise komşuluk ilişkilerinin göz önünde bulundurulması gerektiği tespit edilmiştir.

Komşu kanal girişimi için durdurma bandı başlama frekansı ile yayın yapılan merkez frekans arasındaki farkın önemli olduğu tespit edilmiştir. Bu farkın 25 kHz altında

olduğu durumlarda ardışık iki frekans arasında 25 kHz koruma bandı atanması gerektiği görülmüştür.

Planlama öncesi ölçüm sonucu Şekil 6' da gösterilen 2 no'lu bölge için planlama sonrası aynı noktadan alınan ölçüm sonuçları Şekil 11' de gösterilmiştir. Bu ölçüm sonuçlarına göre 8 ve 9 no.lu baz istasyonları arasında yaşanan girişim planlama sonrasında ortadan kalkmıştır.



Şekil 11. Planlama sonrası alınan ölçüm sonuçları

Çalışma yapılan sistemde 167 km'lik mesafe yakalanmadığı için daha çok komşuluk ilişkileri ve kullanılan filtre çıkış grafiği göz önüne alınarak frekans planı yapmak istenilmiştir. Mevcut frekanslarla yapılan planlama neticesinde 1 ve 3 no.lu olmak üzere 2 adet baz istasyonuna frekans tahsisi yapılamamıştır. Bu baz istasyonlarına tahsis edilecek frekanslar ortak kanal ya da ardışık kanal girişimine neden olacaktır. Bu sebeple çalışma yapılan sistemde RF optimizasyon çalışması yapılarak frekans tahsisi yapan üst kurumdan yeni frekansların tahsis edilmesi gerektiği ortaya çıkmıştır.

4 Sonuçlar

Yapılan çalışma ile sayısal telsiz sisteminde komşu kanal girişimini engellemek için koruma bandı ataması yaparken frekans kaynağının kısıtlı olduğu göz önüne alınması gerektiği görülmüştür. Bu sebeple sistemin kabul ettiği en yüksek bit hata oranının (BER, Bit Error Rate) aşılmadığı komşu kanal girişiminin bir sorun teşkil etmeyeceği tespit edilmiştir.

Ortak kanal girişiminde frekans tekrarı için gereken baz istasyonları arası en kısa mesafe olmadığı durumda baz istasyonları sinyallerinin LoS bölgesinde olmaması gerektiği tespit edilmiş fakat sayısal telsiz sisteminde bu koşulun yetersiz olduğu görülmüştür. Bu sorunun aşılması için ise sistemdeki komşuluk ilişkilerinin göz önüne alınması gerektiği tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu makale konusunda kendimi geliştirmem konusunda bana yol açan değerli ilk şefim Ender Divriklioğlu' na, makalede bahsi geçen çalışmayı yapabilmem için önumdeki engelleri kaldıran değerli müdürüm Ahmet Selami Söğüt' e, yüksek lisans programına başlamama vesile olan değerli

hocam Oğuz Bayat' a ve yüksek lisans programını tamamlama konusunda bana yardımcı olarak akademik yol açan değerli hocalarım Çağatay Aydın ve Doğu Çağdaş Atilla' ya teşekkür ederim.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 7

Kaynaklar

- [1] A. M. C. A. Koster, Frequency Assignment: Models and Algorithms. PhD Thesis, Maastricht University, Maastricht, Netherlands, 1999.
- [2] H. Thue. Frequency planning as a set partitioning problem. European Journal of Operational Research, 6(1), 29-37, 1981. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(81\)90325-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(81)90325-8).
- [3] A. Eisenblatter, M. Grötschel and A. M. C. A. Koster, Frequency Planning and Ramifications of Coloring. Discussiones Mathematicae Graph Theory, 22(1), 51-88, 2002. <https://doi.org/10.7151/dmgt.1158>.
- [4] R.C. Santiago, A .Raymond and V. Lyanders, Enhanced Efficiency and Frequency Assignment by Optimizing the Base Station Location in a Mobile Radio Network. Springer, 14(4), 531-541, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11276-006-0735-5>.
- [5] A. Annunziato and D. Sorbara, TETRA radio performance evaluated via the software package. Mobile Networks and Applications, 5(1), 17-26, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1019123620969>.
- [6] EN 300 392-2 V3.8.1, Terrestrial Trunked Radio (TETRA) - Voice plus Data (V+D) Part 2: Air Interface (AI). European Telecommunications Standards Institute, Sophia Antipolis, 2016.
- [7] EN 300 392-2 V2.3.2, Terrestrial Trunked Radio (TETRA) - Voice plus Data (V+D) Part 2: Air Interface (AI). European Telecommunications Standards Institute, Sophia Antipolis, 2001.
- [8] W. Webb, The Complete Wireless Communications Professional: A Guide for Engineers and Managers. in: W. Webb (Eds.), The Basics of Mobile Radio, Artech House, pp. 34-37, Norwood, 1999.
- [9] P. Stavroulakis, Terrestrial Trunked Radio - TETRA A Global Security Tool. in: P. Stavroulakis (Eds.), TETRA Providing an Acceptable Security, Springer, pp. 52-55, Berlin, 2007.
- [10] I. Stojmenovic, Handbook of Wireless Networks and Mobile Computing. in: I. Stojmenovic (Eds.), Interference in Cellular System, Wiley Interscience Publication, pp. 52-53, Newyork, 2002.
- [11] J. Walrand and P. Varaiya, High-performance Communication Networks. in: J. Walrand and P. Varaiya (Eds.), The Wireless Channel, Morgan Kaufmann, pp. 305-361, California, 2000
- [12] Y. Li, X. Sha, L. Ye and X. Fang, Downlink Resource Sharing for D2D Communications in a Filtered OFDM System. 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), pp. 1-6, Nanjing, China, 15-18 May 2016.
- [13] J. Dunlop, D. Girma and J. Invine, Digital Mobile Communications and TETRA System. in: J. Dunlop, D. Girma and J. Invine (Eds.), Interference to Other System, John Wiley&Sons, pp. 249, West Sussex, 1999.
- [14] H. Hammuda, Cellular Mobile Radio System. in: H. Hammuda (Eds.), Co-Channel Interference Model, John Wiley&Sons, pp. 47-66, West Sussex, 1997.
- [15] Spectrum Efficiency of CDMA-PAMR and Other Wideband Systems for PMR/PAMR. Electronic Communications Committee, Granada, Spain, ECC Report 042, February 2004.
- [16] S. Winder and J. Carr, Newnes Radio and RF Engineering Pocket Book. in: S. Winder (Eds.), Propagation of radio waves, Newnes, pp. 1-24, Woburn, 2002.

