

EM Kirlilik Ölçümü İçin Geniş Bant ve Frekans-Seçici Ölçümlerin Karşılaştırılması

Comparison Between Broadband and Frequency-Selective Measurements for EM Pollution Survey

Cafer Bahadır Tektaş¹, Muhammed Hasan Aslan²

¹Elektromanyetik Laboratuvarı

TÜBİTAK UME

bahadir.tektas@tubitak.gov.tr

²Fizik Anabilim Dalı

Gebze Teknik Üniversitesi

maslan@gtu.edu.tr

Özet

Baz istasyonları, TV vericileri, kablosuz cihazlar gibi aktif antenlerin sayısı arttıkça insanlar elektromanyetik maruziyetten ve sağlıklarından giderek daha fazla endişe etmeye başlamıştır. Bunun bir sonucu olarak, maruz kalınan elektromanyetik maruziyet seviyesinin ölçülmesi gerekli hale gelmiştir. EM kirliliğinin maruziyet düzeyini ölçmek için kullanılan, geniş bant ve frekans seçici diğer adıyla dar bant olmak üzere iki yaygın ölçüm yöntemi vardır. Bu çalışmada, frekans seçici ölçümleri gerçekleştirebilen ve sonucunda güçleri toplayıp toplam maruz kalma seviyesini hesaplayabilen bir yazılım çözümü geliştirdik. Daha sonra, bir elektromanyetik alan probu ile elde edilen geniş bant ölçüm sonuçları ile bir spektrum analizörü ve bir mini-bikonik anten kullanarak gerçekleştirilen frekans seçici ölçüm yöntemi ile elden edilen sonuçları arasında iyi bir karşılaştırma yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Geniş bant, Elektromanyetik, Frekans-Seçici, Ölçüm, Kirlilik

Abstract

As the number of radiators such as base stations, TV transmitters, wireless devices increases, people are getting more and more concerned about the exposure and their health. As a result, it has become necessary to measure the level of electromagnetic exposure that is being exposed. There are two common methods to measure the exposure level of EM pollution; broadband and frequency selective, alias narrow-band, measurement methods. In this work, we developed a software solution that can perform frequency-selective measurements and finally can collect the powers and calculate the total exposure level. Thereafter, we made a good comparison between broadband measurement results obtained with a field probe and frequency-selective ones

which are obtained by using a spectrum analyzer and a mini-biconical antenna.

Keywords: Broadband, Electromagnetic, Frequency-Selective, Measurement, Pollution

1. Giriş

EM kirliliğinin ölçümünde kullanılan iki yaygın yöntem vardır. Bunlardan birincisi, geniş bant alan sensörleri gerektiren ve genellikle frekans seçici ölçüme göre daha az zaman isteyen geniş bant ölçümdür. Geniş bant ölçümü ile ölçüm basit ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Alan probunun izotropik özelliğinden dolayı maksimum alan yönü bilinemez. Öte yandan, geniş bant alan problemleri, radyo, TV yayını veya GSM baz istasyonları gibi farklı frekansların emisyonlarını ayırt etmek üzere tasarlanmamıştır ve ayrıca ölçülen alan seviyelerinin standart sınırlarla karşılaştırılması, frekans seçiciliğinin olmaması nedeniyle çok sorunludur. Buna ek olarak, geniş bant alan problemleri, ölçülen sinyalin modülasyonlarından dolayı sinyal gücünün hızlı değişimlerine cevap veremez. Bir alan probunun kalibrasyon faktörü genellikle sürekli dalga (CW) sinyallerinde geçerlidir, bu nedenle modüle edilmiş sinyaller ölçülürken ek hatalar oluşur. Alan probu ile ilgili bir diğer konu, frekans aralığı boyunca değişken faktörlerdir. Buna ek olarak, halk maruziyeti genellikle geniş bant alan problemlerinin algılama eşiklerindeki bölgede veya altındadır [1,2,3]. İkinci yöntem olan frekans seçici ölçüm, bir spektrum analizörü, bir koaksiyel kablo ve uygun bir anten vasıtasıyla kullanıldığında, yukarıda belirtilen kısıtlamalar ortaya çıkmaz. Frekans seçici dar bant ölçümü ile her okuma için ölçüm frekansı bilinir ve frekansa bağlı anten faktörü uygulanabilir [4]. Böylece maruziyetin doğru bir şekilde belirlenmesi için, uygun frekansa bağlı limitlerde kolayca uygulanabilir. Frekans seçici ölçümün bahsedilen avantajlarına rağmen, geniş bant ölçümüne kıyasla çok zaman alıcı ve kapsamlı olabilir. Çünkü antenler belirli yönlendiriciliğe sahip olduğu için ölçümler farklı polarizasyonlarda gerçekleştirilmelidir [3,5].

Bu araştırmada öncelikle frekans seçici bir ölçüm yazılımı çözümünü Visual C ++ kullanarak tasarladık. Yazılım, tepe noktaları ayrı ayrı belirleyebilir ve ölçülen tepe noktalarına ve tanımlanan limitlere bağlı olarak toplam maruziyeti hesaplayabilir. Aygıt sürücüsü sistemine dayanan yazılımda, çözünürlük, bant genişliği, detektör tipi, ortalama modu vb. gerekli tüm hayati ölçüm parametreleri aynı bir sürücü dosyası üzerinde ayarlanabilir ve ana yazılım çekirdeğinde herhangi bir değişiklik yapmadan uygun sürücü dosyasını seçtikten sonra ölçüm başlatılabilir.

Daha sonra, yapılan araştırmalar ve ortaya koyduğumuz kirlilik ölçümü yazılımı sonucunda, iki yöntem deneysel olarak araştırılmış, laboratuvar ve ofis ortamlarında farklı frekanslarda yapay olarak üretilen çoklu sinyaller eş zamanlı olarak ölçülerek karşılaştırılmıştır.

2. Teori ve Deneysel Düzenek Kurulumu

Standartlarda maruziyet limit değerleri, sırasıyla güç akı yoğunluğu (W/m^2) elektrik alan şiddeti E (V/m) veya manyetik alan şiddeti H (H/m) cinsinden verilir. 300 MHz' in altında, ölçüm noktası uzak alanda olmayabilir. Aynı zamanda ($E=H*377$) eşitliği bu frekanslarda sağlanamayabileceğinden, genel olarak hem elektriksel hem de manyetik alan kuvvetlerinin ölçülmesi önerilir. 300 MHz' in üstünde ise ölçüm noktası muhtemelen bir GSM baz istasyonu gibi aktif antenin uzak alanındadır ve denklik (1)' de belirtildiği gibi elektrik alanının ölçümü yeterlidir [6]. Aksi belirtilmedikçe ve maruziyet limitleri frekansa bağlı olmadığı sürece, maruz kalma seviyeleri her zaman RMS değeri olarak verilir. Çoklu sinyal ve çoklu frekanslı ortamlarda, her sinyal ilgili maruz kalma limitinin bir oranı olarak toplanmalıdır [7]. Tüm sinyaller için bu toplam, denklik (2)' de verildiği gibi "1" değerini aşmamalıdır [8,9]. Bu nedenle, geniş bant alan problemleri ölçümler için uygun değildir. Frekans seçici yöntem ise düzgün bir ölçüm gerçekleştirmek için zorunludur.

$$S\left(\frac{W}{m^2}\right) = \frac{E^2(V/m)}{377(\Omega)} \quad (1)$$

$$\sum \frac{S_{ölçülen}(f_1)}{S_{lim}(f_1)} + \sum \frac{S_{ölçülen}(f_2)}{S_{lim}(f_2)} + \sum \frac{S_{ölçülen}(f_3)}{S_{lim}(f_3)} + \dots \leq 1 \quad (2)$$

Bir spektrum analizörü gibi frekans seçici bir alıcı kullanılırken, çözünürlük bant genişliği (RBW), spektrumu ayırık sinyaller haline getirmek için yeterli olmalıdır. Örneğin, GSM tabanlı ölçümler için, GSM 200 kHz aralıklı birkaç frekans kanalı kullanır. Her bir baz istasyonu, iletim ağı ve ana istasyonun kendisi hakkında bilgi içeren bir temel kanal sağlar. Bu kanal belirli bir frekans bandı kullanır ve buna Yayın Kontrol Kanalı (BCCH) adı verilir. Bu kanal sabit alan kuvvetiyle iletilir. Ses ve veri sinyallerini iletmek için trafik kanalları (TCH) adı verilen bir veya daha fazla trafik kanalı eklenir. Bu kanalların alan şiddeti yükü olarak değişir ve tamamen kapatılabilir. GSM, 200 kHz' lik bir kanal aralığı kullandığından, 100 kHz' lik bir çözünürlük bant genişliği, spektrumu tek tek kanallara ayırtmak için yeterlidir. Ölçüm, bir frekans için herhangi bir konumda, x, y ve z eksenlerindeki

her bir yönde gerçekleştirilmelidir. Her bir yön için elde edilecek elektrik alan şiddeti denklik (3) kullanılarak belirlenir.

$$E_i = V_i \cdot AF \cdot C_L \cdot K_{MOD} \quad (3)$$

Burada E_i , i anten yönüne paralel olarak yönlendirilmiş alan seviyesi, V_i , spektrum analizör ekranında okunan gerilim değeri, AF, anten faktörü, C_L , kablo kaybı, K_{MOD} ise spektrum analizörün modüle edilmiş sinyallere cevabını telafi etmek için kullanılan düzeltme faktörüdür. Spektrum analizörün spesifik bir RBW'si için K_{MOD} , spektrum analizör ve güç ölçerin CW sinyale ve modüle edilmiş sinyale verdikleri tepkilerin karşılaştırılmasıyla basitçe ölçülür.

Daha sonra vektör toplamı ile elde edilen elektrik alan denklik (4) kullanılarak hesaplanmalıdır [10,11].

$$E_{kontrol} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (4)$$

GSM ölçüm örneğine devam edersek, genellikle, ilgili BCCH kanalı frekansları biliniyorsa ölçümler basittir. Bilinmiyor olsalar bile, BCCH kanalı frekanslarının alan güçleri TCH kanallarına kıyasla çok daha dengeli olması nedeniyle kolayca tanımlanabilirler. Öncelikle BCCH kanalı, ışımının x, y ve z bileşenleri için denklik (3)' deki gibi E_{BCCH} olarak ölçülür. Hücrenin izin verilen maksimum güç düzeyi P_{maks} ile çalıştırılmadığını biliyorsak, E_{BCCH_maks} denklik (5)' te verilen şekilde hesaplanır. Servis sağlayıcısından mevcut baz istasyon gücü ve maksimum izin verilebilir güç hakkında bilgi yoksa, bu adımı atlayabiliriz [10].

$$E_{BCCH_maks} = E_{BCCH} \cdot \sqrt{\frac{P_{maks}}{P_{BCCH}}} \quad (5)$$

Tüm TCH kanalları tamamen dolu olduğunda ortaya çıkacak bir hücrenin toplam alan gücü E_{maks} , BCCH' in alan gücünün ekstrapolasyonu ile elde edilir.

$$E_{maks} = E_{BCCH_maks} \cdot \sqrt{n} \quad (6)$$

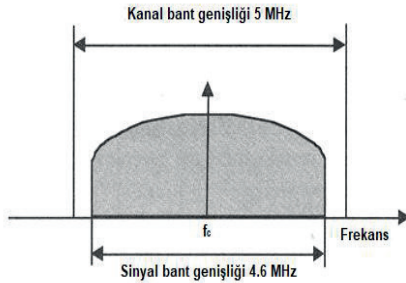
Burada n, BCCH kanallarını da içeren toplam trafik kanalı sayısıdır. Elbette, mümkünse, trafik kanallarının sayısı servis sağlayıcısı tarafından verilmelidir. Belirli bir bölgede GSM ölçümü gerçekleştirildiğinde, tipik olarak her biri 120°'lik açığa sahip üç antenle, 360° derecelik bir alanı kapsayan bir sektör antenin üç BCCH kanalı olacaktır ve bunun yanında diğer sağlayıcılardan gelen olası BCCH kanalları olacaktır. Bu durumda GSM bandı için toplam alan maruziyeti seviyesi denklik (7)'deki gibi olmalıdır.

$$E_{toplam} = \sqrt{E_{maks1}^2 + E_{maks2}^2 + E_{maks3}^2 + \dots + E_{maksn}^2} \quad (7)$$

Burada n BCCH kanallarının sayısıdır. GSM radyasyonu açısından belirli bir noktada "başarılı" veya "başarısız" kararı almak için, belirlenen E_{maks} değerleri denklik (8)' de görüldüğü gibi kullanılır ve nihai sonucun "1" değerinden küçük olması beklenir.

$$\sum \frac{E_{maks1}^2}{E_{lim1}^2} + \sum \frac{E_{maks2}^2}{E_{lim2}^2} + \sum \frac{E_{maks3}^2}{E_{lim3}^2} + \dots \leq 1 \quad (8)$$

Yukarıda belirtilen ölçüm yöntemleri uygun çözünürlük bant genişliği (RBW) ve uygun detektör tipi kullanıldığı sürece UMTS (3G) ve LTE (4G) gibi farklı spektrumlardaki haberleşme sistemleri içinde bazı farklılıklar dışında neredeyse benzer olacaktır. Bu çalışma kapsamında incelenmemiş olsa da UMTS ve LTE bantlarının ölçümünün frekans seçici olarak gerçekleştirilmesi GSM ölçümlerinden farklı olarak bilinmesi gereken bazı noktalar vardır. Bir UMTS spektrumuna baktığımızda, yayın yapan üç sektör antenden her biri Şekil 1’deki örnek UMTS spektrumunda görüldüğü gibi en az bir tane 5 MHz’lik kanal bant genişliğine sahip UMTS sinyali bulunur ve çözünürlük bant genişliğinin (RBW), GSM sinyalinden farklı olarak 5 MHz olması gerekir [12,13].



Şekil 1: Örnek UMTS (3G) sinyali spektrumu

Spektral ölçümde, Şekil 1’deki UMTS spektrumu ne kadar ayrılmıyor gibi gözükse de, merkez frekansın belirlenip ölçülmesi anlık ölçümde doğru sonucu verecektir. Eğer operatör tarafından verilmesi gereken ekstrapolasyon faktörü (K) biliniyorsa ve trafik yükünün olmadığı varsayıldığı durumda ölçülen sinyal ($P_{sinyalizasyon}$), P_{min} olarak kabul edilirse, spektrumun maksimum gücü P_{maks} denklik (9)’da ki gibi bulunur.

$$P_{maks} = K \cdot P_{min} \quad (9)$$

Ancak ölçüm sırasında konuşma kanalları gibi trafik yüküne sebep olacak kanallar varsa, P_{maks} belirgin şekilde beklenenden fazla çıkacaktır. Spektral ölçümün bu dezavantajlarından kaçınmak için kullanılan bir diğer yöntem “kod çözücü” ölçümlerdir. Kod çözücü ölçüm, her bir antenin CPICH sinyali tarafından üretilen alan şiddetini tespit eder. Bu sinyalin gücü 5 MHz’lik tam sinyal bant genişliği üzerinden dağıtılır ve şifreleme kodları tarafından kodlanır. Bir baz istasyonuna ele alırsak, bu istasyona ait 3 sektör antenin her biri için elektrik alan denklik (10)’daki gibi belirlenir. Toplam seviye ise denklik (11)’deki gibi bu sektör antenlerin elektrik alan seviyelerinin toplanmasıyla elde edilir [14].

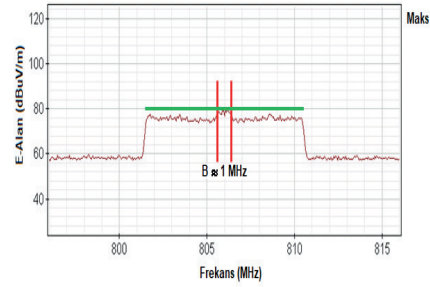
$$E_{sektörN} = CPICH_{powerN} \cdot \frac{P_{maksN}}{P_{CPICH(N)}} \quad (10)$$

$$E_{toplam} = \sqrt{E_{sektör1}^2 + E_{sektör2}^2 + E_{sektör3}^2} \quad (11)$$

Burada N, her bir sektör antenin numarasıdır.

LTE spektrumuna baktığımızda ise yayın yapan her sektör 2 veya 4 antenden oluşmaktadır. Her sektör için farklı kanal bant genişliğine (1.4/3/5/10/15/20 MHz) ve sinyal bant genişliğine (1.08/2.7/4.5/9/13.5/18 MHz) sahip sinyaller bulunabilir.

LTE spektrumunda kontrol kanalı ölçümünde karşımıza Şekil 2’deki gibi örnek bir spektrum analizör görüntüsü çıkacaktır [15].



Şekil 2: Örnek LTE (4G) sinyali spektrumu

Burada, spektrumda iki kırmızı çizgi arasında yer alan çıkıntının bant genişliğinin (1 MHz), LTE sinyalinin toplam bant genişliğine oranı bize ekstrapolasyon faktörünü (K) verecektir. Buradan maksimum elektrik alan (E_{maks}) denklik (12)’deki gibi elde edilecektir. Bu hesaplama yapılırken, spektral ölçümlerde kullanılan RMS (ortalama karekök) detektör için tarama süresinin (sweep time) ayarlanması gerekmektedir. Tarama süresi denklik (13)’deki gibi belirlenir.

$$E_{maks} [dB\mu W / m] = E_{ölçülen} [dB\mu W / m] + K [dB] \quad (12)$$

$$Tarama \text{ süresi} = n \cdot 70\mu s \quad (13)$$

Burada n yatay tarama noktalarının sayısıdır.

Ancak UMTS’de olduğu gibi LTE ölçümlerinde de spektral ölçümlerin bazı sakıncaları vardır. Örneğin spektral ölçüm bir baz istasyonundaki farklı antenlere ait sinyalleri ayıramayacaktır. Ölçüm sırasında bu sektör antenlerden ışıma yapmayan bir anten olsa bile bunu spektral ölçümle belirlemek imkansızdır. Maksimum elektrik alan seviyesini hesaplarken kullandığımız ekstrapolasyon faktörünün antenden antene değişmesi yine yanlış ölçüme neden olacaktır. Bu durumların önüne geçmek için kullanılacak olan yöntem yine “kod çözücü” yöntemidir. LTE baz istasyonlarına baktığımızda, P-SS (Primary Synchronization Signal), S-SS (Secondary Synchronization Signal) ve RS (Reference Signal) sinyalleri antenlere spesifik olarak kodlanmıştır. Bu sinyallerden RS sinyali en kararlı olan sinyaldir. Bu nedenle bir LTE kanalında, her bir anten ait RS değerlerinin ölçülerek kanalın gücüne oranı denklik (14)’deki gibi ekstrapolasyon faktörü K’yı verecektir. K faktörünü kullanarak her bir anten için maksimum elektrik alan denklik (15)’deki gibi hesaplanır. Toplam LTE ise bu maksimum seviyelerin toplamı olacaktır.

$$K_i[dB] = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{\max,i}}{P_{RS,i}} \right) \quad (14)$$

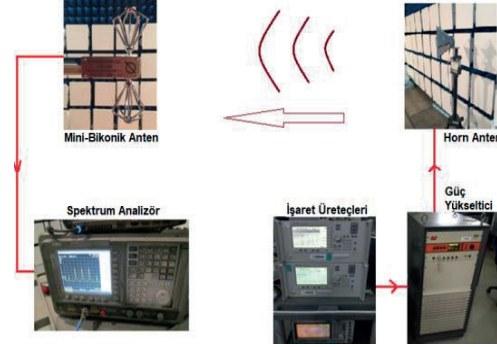
$$E_{i,maks}[dB\mu V/m] = E_{i,RS}[dB\mu V/m] + K_i[dB] \quad (15)$$

Burada, K_i i antenin ekstrapolasyon faktörü, $P_{\max,i}$ i antenin maksimum gücü, $P_{RS,i}$ ise i antenin referans sinyal gücü olarak verilmiştir.

Bu çalışmada, “Elektromanyetik Kirlilik Ölçümü” yazılımını Visual C++ yazılımı ile geliştirdik. Yazılım sadece bu çalışmanın içeriği olan GSM frekansları ölçümüne yönelik olarak değil, TV, radyo, UMTS (3G), LTE (4G), Radar vb. sinyalleri frekans seçici olarak ölçebilecek kabiliyette tasarlanmıştır. Yazılımın kullanımında sürücü dosyaları spektrum analizör ile uyumlu olduğu sürece herhangi bir spektrum analizör kontrolü yazılım tarafından kolaylıkla sağlanabilir yapıdadır. Sürücü hazırlama bölümü de yazılıma entegre edilmiştir. Çözünürlük bant genişliği (RBW), detektör tipi, ortalama tipi (average type) gibi spektrum analizör ölçüm parametreleri, bu ayrı sürücü dosyaları içerisinde ayarlanabilirken, başlama frekansı, orta frekans, durma frekansı, anten faktörü, modülasyon cevabı düzeltme faktörü, kablo kayıpları, maruziyet limitleri gibi parametreler yazılım ana ekranından girilebilir.

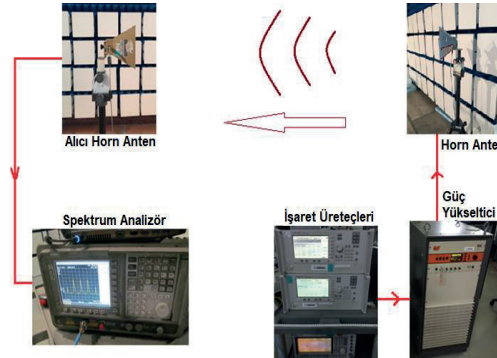
Yazılım, x, y ve z koordinatları için ölçümleri ayrı ayrı gerçekleştirebiliyor ve tespit edilen her frekans için vektör toplamını gerçekleştirebiliyor. Bir eksen ölçümü sırasında, yazılım gürültü seviyesini aşan her tepe noktayı (peak) tespit edebilir ve tespit edilen her noktayı birer birer ölçebilir. Yazılım belirli bir frekans aralığı için, herhangi bir ölçümü başlatmadan, öncelikle ekranda birinci tepe noktasını arar ve ölçer. Daha sonra, önceden tanımlanmış eşiğe göre gürültü düzeyini aşan bir sonraki tepe noktasını arar, tespit eder ve benzer şekilde ölçer. Bu işlemler spektrum analizör ekranındaki son tepe nokta tespit edilene kadar aynı şekilde devam eder. Daha sonra aynı işlem antenin diğer yönleri (Y ve Z) için tekrarlanır. Son olarak, toplam alan seviyesi ve toplam maruziyet seviyesi belirli frekans bandı için, örneğin GSM900 bandındaki tüm tepe noktalar için hesaplanabilir. Eğer istenirse toplam maruziyet seviyesini elde etmek için UMTS (3G), LTE (4G), TV gibi ölçülen tüm frekans bantları hesaplamaya dâhil edilebilir. Son olarak, ölçüm sonucuna göre “başarılı” veya “başarısız” olduğuna denklik (8) kullanılarak yüklenen limit çizgilerine bağlı olarak yazılım tarafından karar verilir. Bu çalışmada, geniş bant ve frekans seçici ölçüm yöntemlerini karşılaştırabilmek için üç sinyal üretici ve sinyalleri tek bir çıkıştan verebilmek için bir araya getiren ve yükselticinin girişine yönlendiren bazı RF birleştiricileri kullanarak farklı frekanslarda çeşitli yapay sinyaller ürettik. Güç yükselticiden sonra, kuvvetlendirilmiş toplam sinyal, belirli yönde yayın yapabilmek ve yeterli bir elektrik alan seviyesi üretilebilmek için verici anten olarak kullanılan horn antenin girişine bağlanmıştır. Alıcı anten olarak kullanılan, çok yönlü ışıma modeli olan ve frekans aralığı 500 MHz ile 3 GHz frekans aralığını kapsayan mini-bikonik anten (Schwarzbeck, SBA 9113), verici antenden 3 m uzağa yerleştirilmiştir.

Kurulan düzeneğin şematik görünümü Şekil 3’deki gibi verilmiştir.



Şekil 3: Alıcı mini-bikonik anten ile kurulan ölçüm düzeneği şematik görünümü

Aynı ölçüm düzeneği, anten yönlendiriciliğinin ölçüm sonuçlarına etkisini göstermek amacıyla, alıcı horn anten (Schaffner, 9118) kullanılarak Şekil 4’deki gibi tekrar kurulmuştur. Ölçümlerde alıcı anten her eksenini ayrı ayrı ölçebilmesi için X, Y ve Z eksenlerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Verici anten ise sadece tek bir eksen yerine X, Y ve Z eksenlerinde de yayın yapabilmemesi için 45° döndürülmüştür.



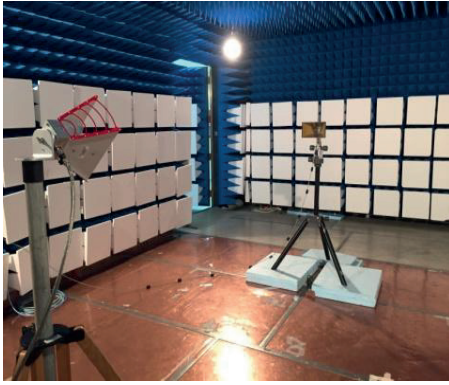
Şekil 4: Alıcı horn anten ile kurulan ölçüm düzeneği şematik görünümü

İlk aşama olarak ölçümlere laboratuvar ortamında (yarı yansımaz oda) başlanmıştır. Öncelikle GSM900 downlink bandı (indirme bandı) ölçümlerini simüle etmek için, 935 MHz, 940 MHz ve 945 MHz frekanslarında, 3 farklı CW sinyal üretilmiş ve bu sinyaller mikrodalga birleştiricileri ile birleştirilerek geniş bant alan probunda yaklaşık 15 V/m ile 25 V/m arasında elektrik alan oluşturacak şekilde işaret üretici sinyal seviyeleri belirlenmiştir.

Ardından kurulmada bir değişiklik yapmadan, geliştirdiğimiz yazılıma, başlangıç ve bitiş frekanslarını girdikten sonra gerekli sürücüler yüklenerek, 200 kHz’lik RBW ve 20 saniyelik ölçüm süresi ile mini-bikonik anten ve horn anten kullanılarak frekans seçici ölçümler yapılmıştır. Ölçümler, kirlilik ölçümlerinde sıklıkla kullanılan detektör tipleri olan RMS ve maksimum tepe detektörleri için gerçekleştirilmiştir. Ölçüm düzeneği ile ilgili resimler sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6’da verilmiştir.

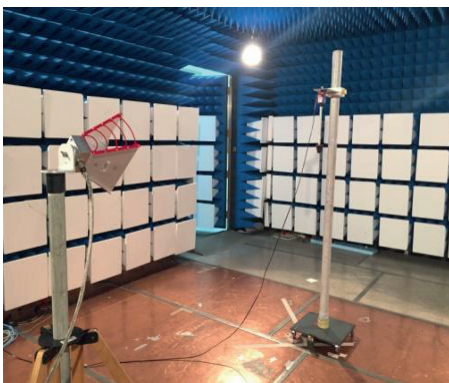


Şekil 5: Laboratuvar ortamında alıcı mini-bikonik anten ile kurulan ölçüm düzeneği



Şekil 6: Laboratuvar ortamında alıcı horn anten ile kurulan ölçüm düzeneği

Alıcı antenler ile yapılan her ölçüm sonrasında, aynı noktaya, Şekil 7' deki gibi bir geniş bant elektrik alan probu konumlandırılarak geniş bant ölçüm yöntemi ile ölçüm yapılmış ve CW sinyaller için bu iki yöntemin sonuçları karşılaştırılmıştır. Daha sonra, GSM radyasyonunu ve kompleks GMSK (Gauss Minimum Kaydırmalı Anahtarlama) modülasyonu simüle etmek amacıyla, aynı frekanslarda bu üç sinyal darbe modülasyonlu (darbe genişliği = $577\mu s$, darbe periyodu = $4600\mu s$) olarak uygulanmış ve benzer karşılaştırma bu durum içinde yapılmıştır [16]. Bütün bu ölçüm adımları GSM1800 bandı için, 1810 MHz, 1840 MHz ve 1860 MHz frekanslarında tekrarlanmıştır.

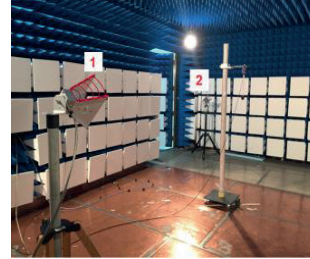


Şekil 7: Laboratuvar ortamında geniş bant alan probu ile kurulan ölçüm düzeneği

İkinci adım olarak, birden fazla kaynağın ve alıcı antene farklı yönlerden gelen radyasyonların olduğu bir ortamı simüle etmek ve alıcı tüm yönlü mini bikonik anten ile yüksek yönlendiriciliğe sahip alıcı horn antenin performanslarını kontrol etmek için, iki verici anten yarı yansız oda içerisinde Şekil 8' de görüldüğü gibi farklı pozisyonlara yerleştirilmiştir. Aynı karşılaştırmalar bu ölçüm düzeneği içinde yapılmıştır ve anten yönlendirmelerinin, ölçüm performansı üzerindeki etkileri açıkça ortaya konmuştur.



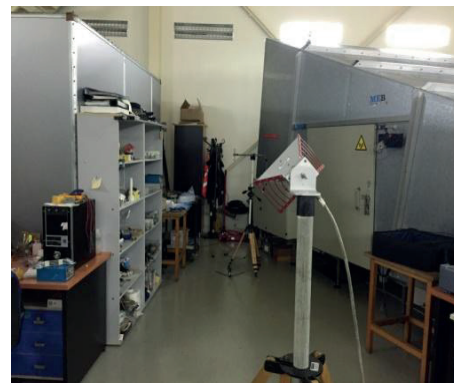
(a) (b)



(c)

Şekil 8: Laboratuvar ortamında çift kaynak ile kurulan ölçüm düzeneği, (a) alıcı mini-bikonik anten, (b) alıcı horn anten, (c) geniş bant alan probu

Son olarak, ortamdaki yansımaların ölçüm sonuçlarına ve karşılaştırmaya nasıl bir etki yapacağını görmek amacıyla, etrafta birçok yansıtıcı yüzeyin bulunduğu bir ofis ortamında, tek kaynak ve mini-bikonik anten kullanılarak, frekans seçici ve geniş bant ölçüm yöntemleri ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Aynı karşılaştırmalar ofis ortamı içinde yapılmıştır. Ofis ortamında yapılan ölçümler ile ilgili örnek resimler Şekil 9 ve Şekil 10' da verilmiştir.



Şekil 9: Ofis ortamında alıcı mini-bikonik anten ile kurulan ölçüm düzeneği



Şekil 10: Ofis ortamında alıcı geniş bant alan probu ile kurulan ölçüm düzeneği

3. Deneysel Sonuçlar

Frekans seçici ve geniş bant ölçüm yöntemlerinin sonuçları, GSM900 ve GSM1800 downlink bantlarında yapay olarak üretilmiş CW ve GMSK modülasyonlu üç sinyal için elde edilmiştir. Laboratuvar ortamında yapılan, tek kaynak ölçümlerinin sonuçları CW sinyal ve GMSK modülasyonlu sinyal için Tablo 1 ve Tablo 2' de, çift kaynak ölçümlerinin sonuçları Tablo 3 ve Tablo 4' te verilmiştir.

Tablo 1: Laboratuvar ortamı, tek kaynak, CW sinyal ölçüm sonucu

Tek Kaynak		CW Sinyal			
		Bikonik (V/m)	Prob (V/m)	Horn (V/m)	Prob (V/m)
GSM 900	RMS det.	15,9	17,6	16,8	17,5
	Maksimum Tepe det.	15,4		17,0	
GSM 1800	RMS det.	18,1	19,3	17,1	19,1
	Maksimum Tepe det.	19,1		17,1	

Tablo 2: Laboratuvar ortamı, tek kaynak, GMSK modülasyonlu sinyal ölçüm sonucu

Tek Kaynak		GMSK Modülasyonlu Sinyal			
		Bikonik (V/m)	Prob (V/m)	Horn (V/m)	Prob (V/m)
GSM 900	RMS det.	5,4	6,1	6,02	6,27
	Maksimum Tepe det.	15,5		17,7	
GSM 1800	RMS det.	6,1	6,8	5,7	6,6
	Maksimum Tepe det.	18,7		17,2	

Tablo 3: Laboratuvar ortamı, çift kaynak, CW sinyal ölçüm sonucu

Çift Kaynak		CW Sinyal			
		Bikonik (V/m)	Prob (V/m)	Horn (V/m)	Prob (V/m)
GSM 900	RMS det.	20,3	22,0	13,5	22,2
	Maksimum Tepe det.	20,4		13,5	
GSM 1800	RMS det.	18,6	20,2	11,6	20,7
	Maksimum Tepe det.	18,8		11,6	

Tablo 4: Laboratuvar ortamı, çift kaynak, GMSK modülasyonlu sinyal ölçüm sonucu

Çift Kaynak		GMSK Modülasyonlu Sinyal			
		Bikonik (V/m)	Prob (V/m)	Horn (V/m)	Prob (V/m)
GSM 900	RMS det.	6,5	7,5	4,8	7,6
	Maksimum Tepe det.	20,2		13,6	
GSM 1800	RMS det.	6,4	7,0	3,9	7,3
	Maksimum Tepe det.	20,2		11,8	

Benzer şekilde ofis ortamında yapılan tek kaynak ölçümlerinin, CW sinyal ve GMSK modülasyonlu sinyal için ölçüm sonuçları ise Tablo 5 ve Tablo 6' da verilmiştir.

Tablo 5: Ofis ortamı, tek kaynak, CW sinyal ölçüm sonucu

Tek Kaynak		CW Sinyal	
		Frekan Seçici	Geniş Bant
		Bikonik (V/m)	EA. Probu (V/m)
GSM 900	RMS det.	22,0	22,5
	Maksimum Tepe det.	21,1	
GSM 1800	RMS det.	19,1	21,0
	Maksimum Tepe det.	18,5	

Tablo 6: Ofis ortamı, tek kaynak, GMSK modülasyonlu sinyal ölçüm sonucu

Tek Kaynak		GMSK Modülasyonlu Sinyal	
		Frekan Seçici	Geniş Bant
		Bikonik (V/m)	EA. Probu (V/m)
GSM 900	RMS det.	8,1	8,1
	Maksimum Tepe det.	22,5	
GSM 1800	RMS det.	6,4	7,3
	Maksimum Tepe det.	18,8	

4. Sonuç

Bu çalışmada, elektromanyetik kirlilik ölçümleri için kullanılan, frekans seçici ve geniş bant ölçüm yöntemlerini deneysel olarak inceledik. Frekans seçici yöntem için, ölçümleri tamamen otomatik hale getirmek amacıyla yazılım çözümü tasarladık ve ölçümleri alıcı (ölçüm) tarafında kullanılan ekipmanlardan bağımsız hale getirebilmek için, ayrı aygıt sürücü sistemini yazılımımıza entegre ettik. Laboratuvar ve ofis ortamlarında yapay olarak sinyal ürettiğimiz GSM900 ve GSM1800 bantlarına ait downlink frekanslarını, frekans seçici ve geniş bant ölçüm yöntemleri ile karşılaştırdık. Çift kaynak ve horn antenin birlikte kullanıldığı ölçümler haricinde, sonuçların birbiriyle maksimum 1 dB' lik farkla uyduğunu gözlemledik. Çift kaynak ve horn antenin birlikte kullanıldığı düzenekte ise iki yöntem arasındaki sonuçlarda Tablo 3 ve Tablo 4' te görüldüğü gibi bu uyum sağlanamamıştır. Bu durum bize, kaynağın yeri ve ışıma yönünün bilinmediği zamanlarda, alıcı olarak horn antenin kullanılması, antenin yönlendiriciliğinden kaynaklı olarak, yanlış ölçümler gerçekleştirebileceğimizi ortaya koymuştur. Ayrıca, GMSK modülasyonlu sinyalleri ölçerken RMS detektörün kullanılmasını, frekans seçici yöntemle yapılacak ölçümlerde daha uygun olduğu ölçüm sonuçları ile görülmüştür. Gelecekte, laboratuvar ve ofis ortamlarında gerçekleştirdiğimiz bu karşılaştırmaları, dışarıda, gerçek baz istasyonlarının civarında, sadece GSM değil UMTS (3G) ve LTE (4G) gibi frekans spektrumlarını da ölçerek gerçekleştireceğiz.

5. Kaynaklar

- [1] T.G. Cooper, S.M. Mann, M. Khalid, R.P. Blackwell, "Exposure of the General Public to Radio Waves near Microcell and Picocell Base Stations for Mobile Telecommunications", NRPB-W62, 2004
Online:
www.ifre.re.kr/board/filedown.php?seq=142
- [2] T.G Cooper, S.M Mann, M. Khalid, R.P Blackwell, "Public exposure to radio waves near GSM microcell and picocell base stations", J. Radiol Prot. 2006 Jun;26(2):199-211, 2006 May 26
- [3] Wolfgang Müllner, Georg Neubauer, Harald Haider , "ADD3D, A New Technique For Precise Power Flux Density Measurements At Mobile Communications Base Stations"
Online:
https://rf.seibersdorf-laboratories.at/fileadmin/uploads/intranet/dateien/2000_a_dd3d_new_technique.pdf
- [4] A.H. Al-Otaibi, D. Al-Ajmi, T. Williams, D. McGee, J.A. Dennis and M.U. Beg, "Monitoring of Electromagnetic Radiation from Cellular Base Stations in Kuwait", Radiation Protection Dosimetry Volume 80, Issue 4, pp.397-404
- [5] Tahani Ahmed Bashir Khalifa, Amin Babiker Abed Alnabi, "Electromagnetic Pollution Emitted from Base Station", International Journal of Science and Research (IJSR), ISSN (Online): 2319-7064.
- [6] As, N., Dilek, B., Şahin, M., E., Karan, Y. "Electromagnetic pollution measurement in the RTE university campus area", Global Journal on Advances in Pure & Applied Sciences, 2014
Online:
<https://www.researchgate.net/publication/271440470>
- [7] Craig W. Fanning, "Evaluating Cell Phone and Personal Communications Equipment and their EMC Effects on Automotive Audio and In-Cabin Modules", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Honolulu, HI, USA, 9-13 July 2017
Online:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4305618>
- [8] Mann SM, Cooper TG, Allen SG, Blackwell RP and Lowe AJ, "Exposure to radio waves near mobile phone base stations". Chilton, NRPB-R321, May, 2000
Online:
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.472.7687&rep=rep1&type=pdf>
- [9] "A Guide to power Flux Density and Field Strength Measurement", NPL, UK, 2004
Online:
<http://www.npl.co.uk/publications/a-guide-to-power-flux-density-and-field-strength-measurement>.
- [10] "GSM measurements with the Selective Radiation Meter SRM-3000", NARDA, Germany, 2007
Online:
http://www.gruppompb.com/support/manuals/narda_srm_application_note.pdf
- [11] Ö. Genc, M. Bavrak, E. Yıldız. "Analysis of the Effects of GSM Bands to the Electromagnetic Pollution in the RF Spectrum". Progress In Electromagnetics Research, Vol. 101, 17-32, 2010.
Online:
<http://www.jpier.org/PIER/pier101/02.09111004.pdf>
- [12] Bornkessel, C., Wuschek, M.: "Exposure Measurements of Modern Digital Broadband Radio Services", German Microwave Conference, Karlsruhe, Germany, 2006
- [13] G. Neubauer, K. Lamedschwandner, S. Cecil, G.Schmid, "Exposure Assessment Methods for Emerging New Technologies"
Online:
http://www.ursi.org/proceedings/procGA08/papers/KAE_p7.pdf
- [14] Christof Olivier, Luc Martens, "Measurement And Processing Techniques For The Exposure Assessment Of Electromagnetic Fields Of Base Stations Using Spread-Spectrum Modulation"
Online:
[http://www.ursi.org/proceedings/procGA05/pdf/KAE.2\(01170\).pdf](http://www.ursi.org/proceedings/procGA05/pdf/KAE.2(01170).pdf)
- [15] Bornkessel, C., Hein M., Wuschek, M. "Measurement of human exposure to LTE base stations present status and future challenges in measurement methodology", European Microwave Conference (EuMC), Paris, France, 7-10 Sept. 2015

**Cafer Bahadır TEKTAŞ**

2014 yılında Beykent Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. Gebze Teknik Üniversitesi'nde Metroloji yüksek lisansına tez aşamasında devam etmektedir. 2014 yılından itibaren TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Elektromanyetik Laboratuvarın'da araştırmacı olarak görev almaktadır. Çalışma alanları arasında sivil ve askeri EMC testleri/ölçümleri ve kalibrasyonları bulunmaktadır. Ayrıca laboratuvarın katılım sağladığı EMRP (European Metrology Research Programme) projeleri'nde de görev almaktadır.

**Prof. Dr. M. Hasan ASLAN**

1984 yılında İstanbul Üniversitesi Fizik bölümünden mezun olmuştur. 1992 yılında İstanbul Üniversitesinden Yüksek Lisans derecesini almıştır. Yüksek Lisans tez başlığı "Monte Carlo Benzeşim Yöntemi ile Protonların Erişme Uzaklık Dağılımlarının İncelenmesi" dir ve tez danışmanlığını Prof. Dr. Çetin Bolcal yapmıştır. 1993 yılında YÖK'nun açmış olduğu yurtdışı Yüksek Lisans/Doktora bursluluk sınavını GYTE Fizik bölümü adına kazanmıştır. Doktora eğitimine 1994 yılında Colorado School of Mines üniversitesinde başlamıştır. Tez çalışması çeşitli yöntemlerle (PVD, CVD, Closed Space Sublimation) üretilmiş çoklu kristal yapısındaki CdS/CdTe ince film tabanlı güneş pillerinin optik karakterizasyonu üzerinedir. Tez danışmanlığını Prof. Dr. Reuben T. Collins yürütmüştür ve 1999 yılında Doktora çalışmasını tamamlamıştır. Yarıiletken malzemelerin ince film üretiminde, elektrik – manyetik ve optik karakterizasyon yöntemlerinde uzmanlaşmıştır. Aynı zamanda sol-gel ve RF sıçratma yöntemiyle metal-oksit ince film üretimi üzerinde çalışmalarını da devam ettirmektedir.