

携帯電話基地局から発射される電波の野辺山45m 電波望遠鏡 に対する影響の評価

齋藤泰文, 高野秀路, 坂本彰弘, 梅本智文, 坪井昌人

(2006年4月28日受理)

Evaluation of interference from a new and nearby cellular phone antenna to the Nobeyama 45-m radio telescope

Yasufumi SAITOH, Shuro TAKANO, Akihiro SAKAMOTO, Tomofumi UMEMOTO,
and Masato TSUBOI

Abstract

We performed the evaluation by calculation and measurement for interference from the antenna tower of cellular phone which was constructed at 2.5 km northwest of the Nobeyama 45-m radio telescope. If the interference is significant, radio astronomical observations using the telescope become difficult. First, we examined the performance of the transmitter, especially harmonics, attenuation characteristics of its filter. Second, we calculated the interference based on the positions of the antenna tower and the telescope and the power level of the transmitter by transmission attenuation formulae recommended by ITU. This result suggests that the interference is not significant. Finally, we measured the test signal from the antenna using the telescope for validity check before the business operation. We did not detect any signal over the noise level.

1. はじめに

携帯電話の普及は近年目覚ましいものがある。野辺山地域もサービスエリアに入り、携帯電話が使える状況である。ところが、通信事業者から野辺山駅付近一帯の携帯電話サービスの品質を良くするため、野辺山宇宙電波観測所から約2.5 km の近距離に携帯電話基地局を新たに建設する計画が伝えられた。このため、野辺山宇宙電波観測所では、電波天文観測に影響がないか通信事業者と共に、計画の段階から調査・検討を進めてきた。まず送信設備の性能（高調波の抑制能力、フィルタの減衰特性、送信アンテナの特性等）のデータの提供を求め、提出されたデータをもとに干渉計算を行った。干渉計算により算出された数値を電波天文観測の保護基準であるITU(International Telecommunication Union:国際電気通信連合)の勧告ITU-R RA.769(文献1)の干渉閾値と比較した結果、当該基地局から発射されるであろう電波の信号強度は同勧告に示す干渉閾値のレベルを下まわることが分かった。また、通信事業者が送信

アンテナ建設の前に、送信機を搭載したバルーンを上げて地上30 m 及び40 m の高さから電波を発射しサービスエリアの調査を行った。この機会を捉えて、野辺山宇宙電波観測所でもこの電波を観測し、電波天文観測への影響を調べた。これらの行程を経て、通信事業者は送信用アンテナ鉄塔を建設した。しかしながら、実際に携帯電話基地局から電波が発射された場合、送信電波が電波天文観測に影響を与えないものであるかどうかを検証するため、我々は通信事業者が営業開始するのに先立ち、送信アンテナから通信に使用する強度の電波を発射してもらい、野辺山宇宙電波観測所の電波天文観測施設において観測し、その結果を評価した。以下、その詳細を報告する。図1 は野辺山宇宙電波観測所から見た八ヶ岳方面の遠望、図2 は、送信局と野辺山45 m 電波望遠鏡(以下、45m望遠鏡という)の地図上の位置である。



図1 野辺山宇宙電波観測所から八ヶ岳方面

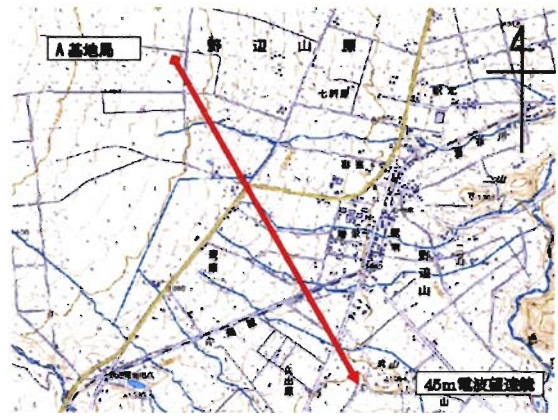


図2 野辺山宇宙電波観測所付近(電子地図ソフトを使用)

2. 天文バンドへの干渉計算

電波天文では宇宙から到来する微弱な電波信号を捉えなければならないため、ITU では、電波天文バンドにおいて干渉閾値を定め、電波天文観測局を周りの人工の電波から保護している。電波天文バンドごとの干渉閾値は電波天文観測の保護基準である勧告ITU-R RA.769 の別表に掲げられている。この表は連続波 (Table 1)、スペクトル線 (Table 2)、VLBI (Very Long Baseline Interferometry：超長基線干渉計による観測) (Table 3) の各種別に3つに分かれている。表1に、以下の計算に必要な数値を勧告から抜粋して掲げた。通信事業者の建設計画によると携帯電話基地局の基本波は2.13～2.15 GHz 帯であり、この基本波の高調波である11 乗倍波がアンモニア分子の電波天文バンド(23.6～24.0 GHz)に入る。23.6～24.0 GHz の周波数帯は、ITU 条約に基づく周波数分配の上では他のすべての能動発射を禁止する発射禁止帯であり、連続波観測と多くのスペクトル線観測が行われている。アンモニアは、暗黒星雲、及び星が形成されつつある領域など、多くの天体で比較的豊富に存在する分子である。アンモニアが出す電波を観測することで、暗黒星雲の温度などの情報を得ることができる。23.6～24.0 GHz の周波数帯は電波天文において重要な周波数帯の一つである。

Table 1(連続波)			
中心周波数 (MHz)	参照帯域幅 (MHz)	閾値 入力(dBW)	閾値 pf(dBW/m ²)
23800	400	-195	-147

Table 2(スペクトルライン)			
中心周波数 (MHz)	帯域幅 (kHz)	閾値 入力(dBW)	閾値 pf(dBW/m ²)
23700	250	-210	-161

表1 電波天文観測の保護基準である勧告ITU-R RA.769 の干渉閾値

2.1 信号強度の計算

建設予定地地上30 m のアンテナから、携帯電話基地局電波(基本波2150 MHz,送信空中線電力20W)を発射すると仮定し、11乗倍波：23650 MHzは、45 m 望遠鏡ではどのくらいの強度で受信できるかを計算した。ただし、基地局の送信機は1 台のみとした。計算に当たっては、送信点と受信点間の距離は2.5 km で、見通し距離内にあるものとした。近距離であるところから地球の曲率のパラメータ及び空気中の水蒸気による減衰の考慮は必要ないと判断し、計算には入れていない。また、送信局と45 m望遠鏡の間の立ち木による減衰はないものとした。

受信点における信号強度は、次式で計算できる。

$$P_R = P_t + G_t + G_r - L_{bf} - L_{f1} - L_p - L_f \quad (1)$$

ただし、

P_R : 受信電力(dBm)

P_t : 送信電力(dBm)

G_t : 送信機側アンテナ利得(dBi)

G_r : 受信機側アンテナ利得(dBi)

L_{bf} : 自由空間伝搬損失(dB)

L_{f1} : 送信側フィルタ減衰量(dB)

L_p : 送信アンテナ指向性減衰量(dB)

L_f : 給電系損失(dB)

とする(注：dBi は、無指向性アンテナを基準とする絶対利得であることを表す)。

まず、送受信点間の自由空間伝搬損失を計算する。送受信点間における自由空間伝搬損失 L_{bf} は、ITU 勧告ITU-R PN.525 (文献2)の式から、

$$L_{bf} = 32.4 + 20 \log f + 20 \log d \quad (dB) \quad (2)$$

である。

ただし、

f (MHz) : 送信周波数、この場合は23650

d (km) : 送受信点間の距離、この場合は2.5

(通信事業者提供値)とする。これらを代入して
 $L_{bf}=32.4+87.48+7.96=127.8$ (dB) (3)
 となった。

次に、受信側の計算をする。

(受信側)

ITU 勧告ITU-R PN.525 の式では、電波天文の受信アンテナは無指向性として計算することとされているため、

G_R : 受信側のアンテナ利得=0 (dBi) (4)
 である。

さらに、送信側の数値(主に通信事業者提供)は、
 (送信側)

P_t : 送信局の送信電力(11 通倍波)
 (通信事業者提供値)=-26 dBm/MHz 以下

G_t : 送信機側アンテナ利得=0 (dBi)

L_{f1} : 送信側フィルタ減衰量
 (通信事業者提供値)=80 (dB)

L_p : 送信アンテナ指向性減衰量
 (通信事業者提供値)=2.5 (dB)

L_f : 給電系損失 (送信側)
 (通信事業者提供値)=5 (dB)

である。

よって、これらの数値を(1)式に代入して計算すると、

P_R (受信電力)=-241.3 dBm/MHz 以下 (5)
 となった。

2.2 信号強度の評価

(1)ライン観測の場合

ライン観測の場合は、ITU 勧告ITU-R RA.769 の閾値(23.7 GHz において-210 dBW/250 kHz)と比較する。まず、単位の変換を行うと、
 -241.3 dBm/MHz = -271.3 dBW/MHz、さらに250 kHz幅に変換すると $1/4 = 6.02$ dB下がる。
 よって、最終的な信号強度は、 -277.32 dBW/250 kHz (上限値)となる。これは、閾値を十分みたす。

(2)連続波の場合

連続波の場合は、上記ITU-R RA.769 の閾値(23.8 GHz において-195 dBW/400 MHz)と比較する。連続波の場合は、トータルパワーとしては -271.3 dBW (上限値)となる。これは、連続波の閾値を十分みたす。

3. 基地局からの試験電波の観測

3.1 観測の目的

携帯電話基地局(以下、A 基地局という)から電波を発射し、野辺山宇宙電波観測所において基本波(2.14 GHz 帯)及びこの11 通倍波(23.6 GHz帯)について、スペクトラムアナライザ及び45 m望遠鏡を使用して、周波数及び信号強度を観測し、A 基地局からの送信電波が電波天文観測に影響を与えないレベルであるか否かを確認する。

3.2 送受信装置の位置の確認

観測に先立って、まず、A 基地局送信アンテナと45m望遠鏡の緯度・経度を調べた。調査は電子地図ソフトを使用して行った。

以下に調査結果を示す。図2は国土地理院発行の2万5000分の一地図上で上記ソフトを使用して、求めた位置である。なお、緯度・経度の調査に当たっては、現在では日本測地系(Tokyo など)は特殊な用途にしか用いられないため、国際標準として一般に広く使われている世界測地系(WGS84)を用いた。この結果、45 m 望遠鏡からA 基地局の方角は、 331.7° と出た。以下に世界測地系と日本測地系の数値を比較する。

45 m 望遠鏡位置

(世界測地系)

北緯 $35^\circ 56' 40.17''$

東経 $138^\circ 28' 20.91''$

(日本測地系)

北緯 $35^\circ 56' 29.50''$

東経 $138^\circ 28' 32.40''$

3.3 観測方法の検討

はじめに送信電波の観測方法について検討した。まず、基本波を無変調で発射し、これをスペクトラムアナライザを用いて観測し、送信電波を確認したあと、変調がかかった基本波を同様にスペクトラムアナライザで観測し、A 基地局から確実に電波が出ていることを確認する。次に45m望遠鏡を用いて無変調波の11通倍波を観測することとした。45 m望遠鏡を用いて観測するにあたっては、観測時間の見積もりを行い、周波数スイッチ(目的の電波信号を検出するために、受信周波数を切替えて観測する方法)かポジションスイッチ(目的の電波信号を検出するために、望遠鏡を空間方向

に振って観測する方法)かを検討した。検討の結果、地上にある送信局からの電波の観測はドップラートラッキングをする必要はないため、局部発信器の周波数を固定する必要があり、一方、局部発信器の周波数を固定すると周波数スイッチはできないので、ポジションスイッチで行うこととした。また、その状態でこれらの観測とは別に、目的の携帯電話基地局からの信号が確実に電波分光計の正しい周波数に出ているかの確認を行った。すなわち、あらかじめ45m望遠鏡下部機器室において、シンセサイザからA基地局の送信電波と同じ周波数の信号を使用する受信機に入力して、データを取得し解析を行い、上記のことを確認した。

3.4 携帯電話基地局の基本波の観測

A基地局の基本波 [周波数: 2147.2 ± 2.4 MHz, 送信空中線電力: 無変調波は8 W (=39 dBm), 変調波は16 W (=42 dBm)で送出]の観測は、2005年6月15日午前中に野辺山太陽電波観測所玄関にて行った。観測に当たっては自作の2.14 GHz 受信用グラウンド・プレーンアンテナ(1/4 λ)1台、スペクトラムアナライザ(Agilent E4407B)1台、2 GHz用アンプ(利得18 dB) 2個の機材を使用した。図3は基本波の受信システムであり、図4はそのうちのグラウンド・プレーンアンテナである。



図3 基本波受信システム

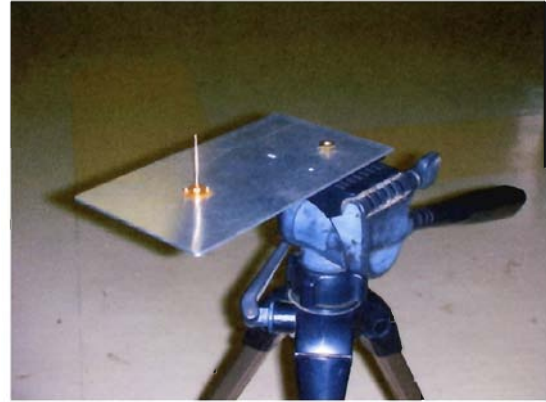


図4 グラウンド・プレーンアンテナ

3.4.1 基本波の観測結果

A 基地局からの基本波のスペクトルを確認するため受信したところ、無変調波は、正しく2.1472 GHz に、変調波は、 2.1472 ± 0.0024 GHz に出ていることがわかった。図5、図6及び図7において、2.135 ~ 2.140 GHz 及び2.140 ~ 2.145 GHz に出ている電波(近隣局と表示)は既存の携帯電話基地局からのものであり、縦軸は絶対信号強度を表す。実測値は、通信事業者の提供データに基づく計算値より10~15dB程度低いレベルであった。これは送信アンテナの指向性によるものと考えられる。

3.4.2 基本波の2 逡倍波の観測結果

無変調波を観測するとき、併せて基本波の2逡倍波を観測した。2~4 GHz 帯まで18 dB の利得があるアンプを2個(=36 dB)使用して観測した結果、2.1472 GHz の2 逡倍波4.2944 GHz は受信

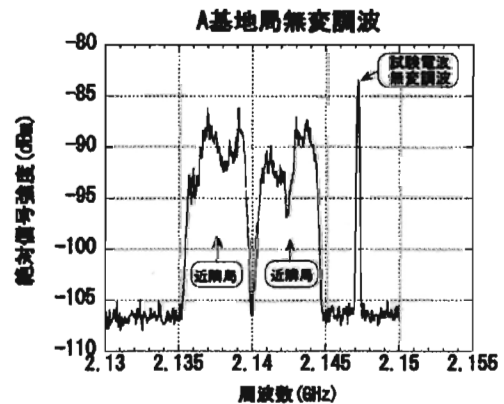


図5 基地局無変調波
(「近隣局」は、既存の基地局からの電波である。図6、図7 も同様)

限界下限値未満で、受信されていないことがわかった。また、当該事業者の既存の基地局送信波の2通倍波(4265.6, 4275.2, 4284.8, 4294.4 各MHz)は、いずれも受信を確認することはできなかった。この領域のスペクトルを図8に示した。図8においてピークを示す4本の電波は由来不明のものである。

この観測より以前に、他の2.1GHz帯を使用する携帯電話基地局において3通倍波を観測したところ、2通倍波のノイズレベルよりさらに7dB程度低いノイズレベルで受信を確認できなかったため、今回3通倍波は観測しなかった。

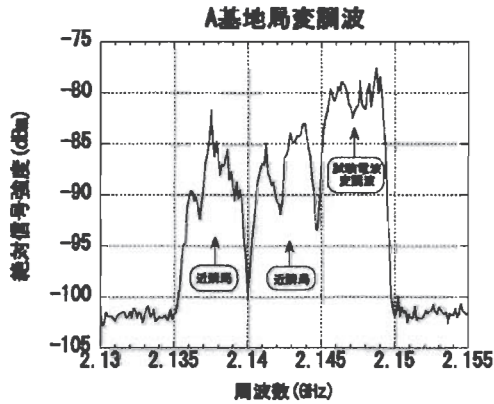


図6 基地局変調波

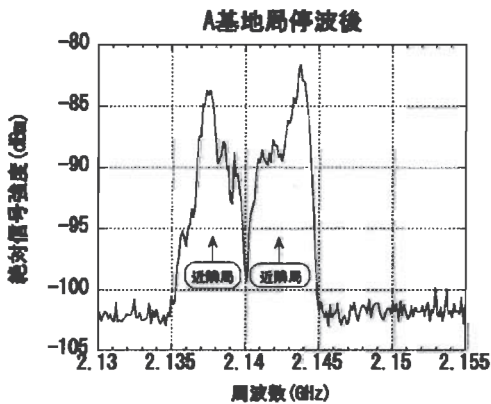


図7 基地局停波後

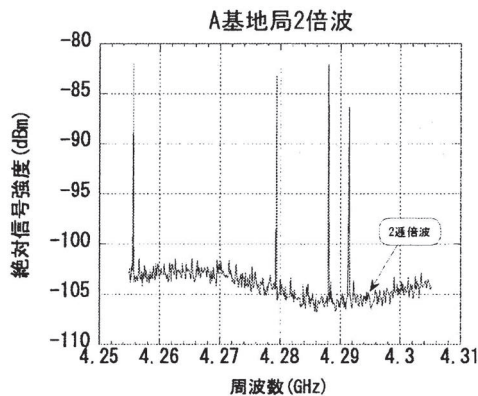


図8 基本波の2通倍波付近の観測

3.5 基本波の11通倍波の観測

A 基地局の基本波の無変調波の11通倍波(周波数: 2147.2 MHz × 11 = 23619.2 MHz, 基本波の送信空中線電力: 8 W)の観測は、2005年6月16日に45 m 望遠鏡を使用して行った。機材は22 GHz帯受信機(H22)1台、音響光学型電波分光計(AOS)、デジタル分光計(AC45)を使用して行った。

3.5.1 観測データの取得及び解析

はじめに、観測しながら大まかな解析を行ったところ、観測すべき11通倍波(23619.2 MHz)は受信できなかったため、その後はA 基地局の方角を中心に集中的に観測した(図9)。図9において、 Ta^* は受信電波のアンテナ温度である。観測方法は、巻末附録に示す。

4. 観測結果と考察

A 基地局からの送信電波の11通倍波を45 m 望遠鏡のデジタル分光計を用いて観測したところでは、4 kHz 分解能のモードで無変調波は観測されなかった。ただし、このときの雑音のrms (root mean square: 自乗平均誤差)は0.31 Kであった。

この結果とITU-R RA.769 勧告の干渉閾値との比較を行う。同勧告で想定されている250 kHzの分解能で考えると、雑音のrmsは0.035Kとなる。

上記勧告の干渉閾値と比べるために、雑音のrmsに対応するpfd (power flux density: フラックス密度)の上限値を求めてみる。(文献3 式2・36'及び式2・38 参照)

$$S \times \Delta f = 2 \times k \times \Delta Ta^* / (\eta_a \times A_p) \times \Delta f \\ = 2.5 \times 10^{-22} \text{ W/m}^2$$

ただし、

S: 全フラックス

Δf : 周波数分解能

k: ボルツマン定数 ($k = 1.3807 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$)

ΔTa^* : アンテナ温度変化分

η_a : アンテナの開口能率 (aperture efficiency)

A_p : 集光面積

観測時はEL=12°であり、送信局とは正対していない。そのため、45 m 望遠鏡のゲインは70 ± 10 dB程度落ちた状態である。(このゲイン落ちの値は、広角パターンの測定値による)

したがって、上限のpfdは、 $2.5 \times 10^{-15} \text{ W/m}^2$ 程度である。これは、 $-146 \pm 10 \text{ dBW/m}^2$ 程度となる。ITU-R RA.769 勧告の干渉閾値は

-161 dBW/m² なので、誤差を考えると閾値より5 dB程度高い上限を押さえたことになる。

5. その他

野辺山宇宙電波観測所において観測を行った時に、同時に野辺山太陽電波観測所においても観測を行い、日常の観測に使用している2 GHz 帯強度・偏波計への影響を調べた。その結果、試験に使用した周波数 2147.2±2.4 MHz 及び既存の局の2135~2145MHzの電波では問題はないが、2135MHzより低い周波数帯を使うと影響を受ける可能性があることがわかった。よって、今回の試験観測の結果をもとに、野辺山宇宙電波観測所及び通信事業者双方で打合わせを行い次のことを確認した。

- (1) A基地局は、2135 ~2145 MHz を使用する。
- (2) 現時点での増波計画はないが、2132.8 ±2.4 MHz を使用する場合は影響が出る可能性が考えられ、今回未調査であるため事前に協議する。

謝辞

このたびの携帯電話基地局からの電波天文観測への影響の調査について、技術データの提出、さらに送信電波の観測に対し、通信事業者（株）NTT ドコモ及び工事業者日本コムシス（株）には積極的に協力していただいた。また、実測に際しては、野辺山宇宙電波観測所及び野辺山太陽電波観測所の関係各位に様々な助言、協力をいただいた。さらに、45 m望遠鏡と送信アンテナ間の距離測定には杉本智彦氏提供のフリー電子地図ソフト「カシミール3D」を使用した。記して感謝する。

参考文献

- 1) 国際電気通信連合勧告 ITU-R RA.769.
- 2) 国際電気通信連合勧告 ITU-R PN.525.
- 3) 赤羽賢司, 海部宣男, 田原博人 :
宇宙電波天文学, 共立出版(1988).

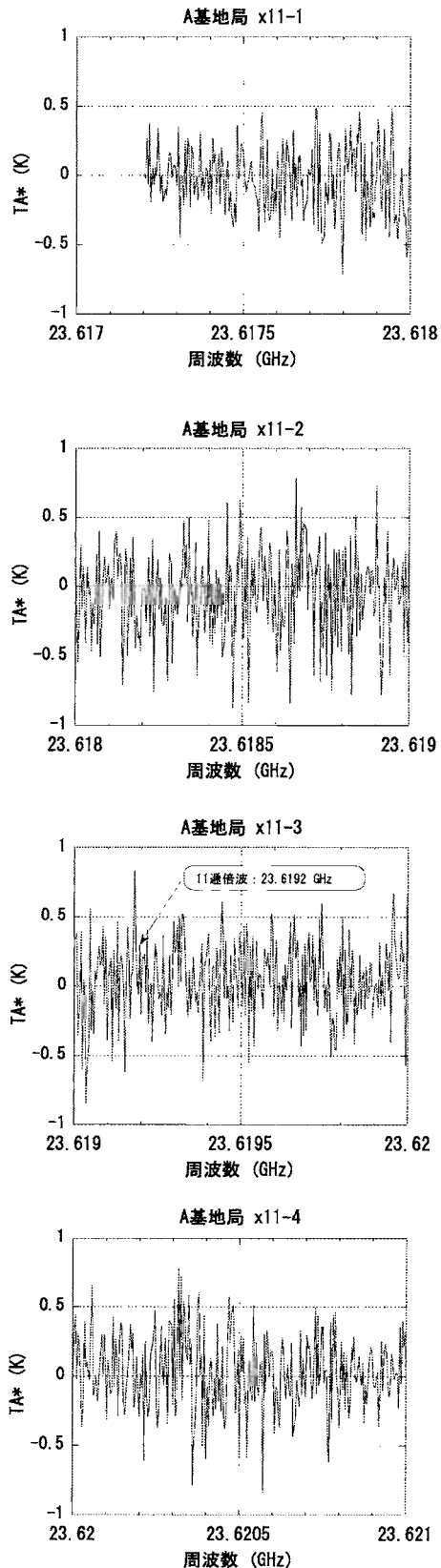


図9 送信波の11逡倍波付近のスペクトル

附録

45 m 電波望遠鏡による基本波の 11 遷倍波の観測方法

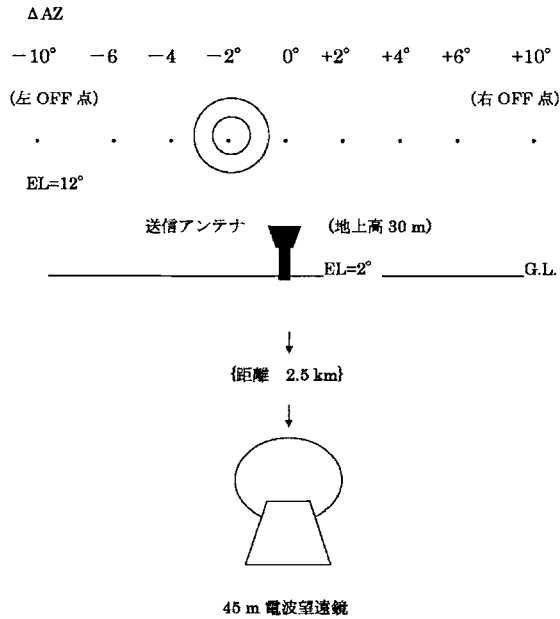


図10 45m電波望遠鏡観測概念図

観測にあたっては、まず、観測する電波の受信信号が強い場合と弱い場合の観測方法を検討した。はじめに両方の場合に共通する観測方法を決めて観測し、次に信号が強い場合と弱い場合とに分けて観測することを想定した。観測手順は以下のとおりである。

(1)はじめの観測

はじめに、基本波を無変調(2147.2 MHz)で送出し、この遷倍波を受信する。

携帯電話の基地局は、45 m 望遠鏡から北を0°として東回りに方位角331.7°の方角にある。この方角を中心に仰角(EL)を12°に固定して、方位角(AZ)を±2°, ±4°, ±6°ずらした点(ΔAZ)についてそれぞれ観測する。

$$AZ = 331.7^\circ, EL = 12^\circ$$

$$\Delta AZ = -6^\circ, -4^\circ, -2^\circ, 0^\circ, +2^\circ, +4^\circ, +6^\circ$$

(2)受信信号が強い場合

受信信号が強い場合は、さらに仰角を20°に上げて(1)と同様の以下の観測を行う。

(3)受信信号が弱い場合

信号が弱くて受信できない場合は、信号源の方角を時間をかけて観測し、S/Nをあげる。

$$AZ = 331.7^\circ, EL = 12^\circ$$

$$\Delta AZ = -2^\circ, 0^\circ, +2^\circ$$

(4)観測時間の見積もり

P-SW(ポジションスイッチ)の方法で観測する場合のノイズrmsの式からON点の観測に要する時間を以下のように算出した。

(式)

$$\text{ノイズrms} = T_{\text{sys}} \times \sqrt{2} / (\sqrt{\Delta\nu} \times \sqrt{t_{\text{on}}})$$

ただし、 $\Delta\nu$ は周波数分解能(Hz)、 t_{on} はON点の観測時間(sec)とする。この式を変形して、

$$t_{\text{on}} = T_{\text{sys}}^2 \times 2 / (\Delta\nu \times \text{rms}^2)$$

ここで、 $\text{rms} = 10 \text{ mK}$, $T_{\text{sys}} = 300 \text{ K}$, $\Delta\nu = 5 \times 10^6 \text{ Hz}$ (携帯電話1波のバンド幅)として計算すると、

$$t_{\text{on}} = 360 \text{ sec} = 6 \text{ min}$$

すなわち、ON点を観測する時間は6分必要である。また、45 m 望遠鏡が360°回転するのに必要な時間は20分であることから計算して、1°移動するのに要する時間は3秒である。

これらの数値をもとに、観測時間を計算した結果は、以下のとおり。

(5)はじめの測定及び受信信号が強い場合の観測時間

※観測ポイントと移動角度を示すと、以下のようになる。

基地局の位置を0°として

左OFF点を-10°, 右OFF点を+10°とすれば、観測点は以下の各点である。

$$-10^\circ, -6^\circ, -4^\circ, -2^\circ, 0^\circ, +2^\circ, +4^\circ, +6^\circ, +10^\circ$$

次に、観測の順番、観測位置、移動角度を書く。

- 0°で観測
- 0°から2°移動し -2°で観測
- 2°から8°移動し -10°で観測
- 10°から6°移動し -4°で観測
- 4°から2°移動し -6°で観測
- 6°から4°移動し -10°で観測
- 10°から10°移動し 0°で観測
- 0°から2°移動し +2°で観測
- +2°から8°移動し +10°で観測

+10° から6° 移動し +4° で観測

+4° から2° 移動し +6° で観測

+6° から4° 移動し +10° で観測

ここで、ON点とOFF点にかける時間は1点あたり20秒として

$$20 \text{ sec} \times 12 = 240 \text{ sec} \quad (1)$$

また、観測点の移動に要する時間を求めると、移動角度は次のようになる。

$$2^\circ + 8^\circ + 6^\circ + 2^\circ + 4^\circ + 10^\circ + 2^\circ + 8^\circ + 6^\circ + 2^\circ + 4^\circ = 54^\circ$$

ここで、1° 移動するのに3 sec 必要なので、
 $54 \times 3 = 162 \text{ sec} \quad (2)$

移動に要するタイムラグ(1移動につき10秒と仮定)

$$11 \text{ 移動} \times 10 \text{ sec} = 110 \text{ sec} \quad (3)$$

これらを単純に足し合わせると、

$$240 + 162 + 110 = 512 \text{ sec} \quad (4)$$

各点で6 分間積分するためにはこのシーケンスを18回行う必要がある。

$$(240 + 162 + 110) \times 18 = 9216 \text{ sec} = 2.56 \text{ hr} \quad (5)$$

受信電波が強いときは、他のEL の場合も含めて最大3セット必要であり、

$$2.56 \times 3 = 7.68 \text{ hr} \quad (6)$$

のトータル観測時間が必要である。

(6) 受信信号が弱い場合の観測時間

受信信号が弱い場合は、 ΔAZ での中心3点に対して以下の観測を行う。

左OFF 点を -10° 、右OFF 点を $+10^\circ$ とすれば、観測点は以下の各点である。

$$-10^\circ, -2^\circ, 0^\circ, +2^\circ, +10^\circ$$

次に、観測の順番、観測位置、移動角度を書く。
 0° で観測

0° から 2° 移動し -2° で観測

-2° から 8° 移動し -10° で観測

-10° から 10° 移動し 0° で観測

0° から 2° 移動し $+2^\circ$ で観測

$+2^\circ$ から 8° 移動し $+10^\circ$ で観測

ここで、ON 点とOFF 点にかける時間は

$$20 \text{ sec} \times 6 = 120 \text{ sec} \quad (1)$$

観測点の移動に要する時間

$$2^\circ + 8^\circ + 10^\circ + 2^\circ + 8^\circ = 30^\circ$$

ここで、1° 移動するのに3 sec 必要なので、
 $30 \times 3 = 90 \text{ sec} \quad (2)$

移動に要するタイムラグ (1 移動につき10秒と仮定)

$$5 \text{ 移動} \times 10 \text{ sec} = 50 \text{ sec} \quad (3)$$

これらを単純に足し合わせると、

$$120 + 90 + 50 = 260 \text{ sec} \quad (4)$$

(1シーケンスの所要時間)

rms を半分の5 mK まで下げることが想定して、はじめの観測で行った18シーケンスの3倍の54シーケンスをさらに追加で行う。

$$(120 + 90 + 50) \times 18 \times 3 = 14040 \text{ sec} = 3.9 \text{ hr} \quad (5)$$

よって、信号が弱い場合のトータル観測時間は、
 $2.56 \text{ hr} + 3.9 \text{ hr} = 6.46 \text{ hr} \quad (6)$

信号が弱く、受からない場合は、これをもって終了とする。

以上の検討結果から、データを途中で処理するなどの時間も含めて、合計8時間の観測時間が必要であると見積もった。