

## 5. 8GHz 太陽発電衛星 (SPS) と各種無線システムとの干渉評価とその軽減法

### Interference Assessment between Solar Power Satellite (SPS) System and Other Wireless Systems and its Relaxation Strategies

初田 健\* 井上直基\*\* 上野健治\*

Takeshi Hatsuda\*, Naoki Inoue\*\* and Kenji Ueno\*

**Abstract :** The Solar Power Satellite/Station (SPS) system is considered as one solution for future energy problems. On the other hand, there are many existing satellites on the geostationary satellite orbit (GSO) and the congestion of the GSO will become more severe. The SPS system with 2.45 GHz transmitter, 6.72 GW power and one km square antenna on the GSO are proposed by NASA. The Interference assessment between SPS system and Fixed Satellites Service (FSS) and wireless LAN are carried out. As a result, interference constraints in 11.6 GHz band FSS and 5.8 GHz wireless LAN are severe. Some strategies for relaxation of interference are discussed for co-existing between SPS and other systems.

#### 1. まえがき

将来のエネルギー危機、地球温暖化などの解決法の一つとして、太陽発電衛星 (SPS) が期待されており、各種の研究が継続されている [1~5]。NASA で提案された SPS は静止軌道上に衛星を打ち上げ、発電した電力を、送信周波数: 2.45GHz、送信電力: 6.72GW (98.3dBW)、送信アンテナ寸法: 1kmx1km の仕様で地上に伝送する方式が考えられている。

一方、静止衛星軌道の混雑は、最近の通信需要の増大によりますます激しくなっており、今後さらに増加が予想される。さらに、同じ ISM (産業科学医療用) 周波数帯を使用する無線 LAN、ブルートウースの普及がブロードバンド用として端末数が増加しており、これとの干渉が予想される。

このような SPS と既存の GSO 上の通信衛星、無線 LAN との干渉の検討は、SPS 計画を推進するに当たって、重要な検討事項である。

すでに、干渉の具体例として送信機に 2.45GHz を使用した場合の高調波として、第 2 (4.9GHz)、第 5 (12.25GHz)、第 8 (19.6GHz)、第 11 (29.6GHz) が FSS の上り回線、下り回線などとの干渉は報告した [1]。

この報告では、5.8GHz 帯を使用した時の干渉評価を検討し、11.6GHz 帯 FSS と 5.8GHz 無線 LAN との干渉が厳しいことを述べている。干渉軽減の各種方策を検

討し、SPS と他のシステムの共用の方法を考察している。

#### 2. FSS/無線 LAN と SPS 間の干渉特性の必要性

GSO は 360° の一本の曲線上の有限の資源であり、多数の通信衛星が打ち上げられ、電話、TV、データの伝送などに使用されている。これらの GSO 上の既存の衛星は、相互干渉を回避するために厳しい干渉条件を ITU の無線通信規則 (RR) で定めており、これに基づいて通信衛星を打ち上げている。一方、最近のブロードバンド回線として、無線 LAN (ブルートウース) の使用が着目され、端末数も増加している。

送信機に 5.8GHz 帯を使用した場合、基本波のみならず高調波を発生し、送信アンテナも高次モードを有しており、これらの高調波が FSS/FS の業務に干渉を与える。これらの中で、基本波は無線 LAN への干渉、第 2 (11.6GHz) 高調波が FSS の下り回線に干渉を与える可能性を有している。これまで具体的な FSS/FS 方式を仮定した計算が行われていなかったが、ここでは、干渉、被干渉の 2 方式間の D/U を計算することで干渉評価を行っている。

#### 3. 計算パラメータの仮定

##### 3.1 送信機の高調波レベルの推定

送信機の高調波レベルは送信機の種類、例えば、進行

波管、クライストロン、固体増幅器(SSPA)などにより異なった値となっている。干渉評価のため、ここでは 2.45GHz のマグネトロンに実測値<sup>[5]</sup>を使用して計算を試みる。実測値として、最も広く使用されている電子レンジ用マグネトロンの例を使用し、ほぼ-70dBc が得られているので、計算ではこの値を用いる。

**3.2 SPS アンテナの基本波と高次モード利得：**SPS のアンテナはダイポール、パッチアンテナ、鏡面アンテナなどの代替案が考えられ、それぞれ特徴を有している。ここでは、ストリップ線路上に構成された図 1 のようなパッチアンテナを合成したアレーの例を計算に用いた。パッチアンテナは誘電体基盤上のパターン構成で量産に適し、軽量化、経済性の点でも優れている。TM<sub>mn0</sub> で励起された円形パッチアンテナの放射電界は文献[5]で述べているので、ここでは導出を省略し、結果を干渉計算に使用する。

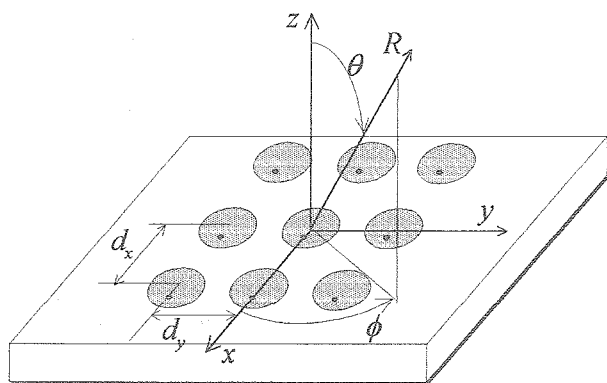


図1 パッチアンテナアレーの構成例

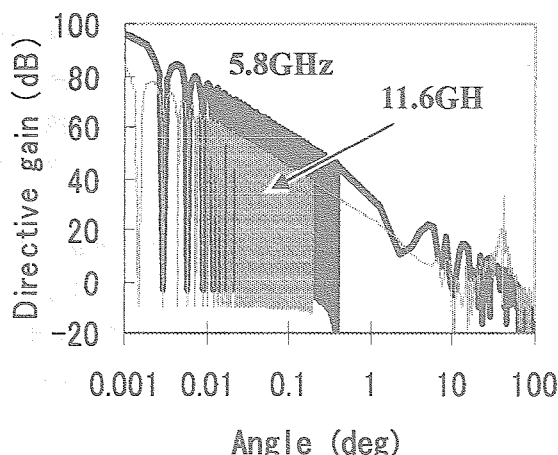


図2 パッチアンテナアレーの特性例

放射パターンを計算するために、パッチ半径  $a=9.54\text{mm}$ 、素子間隔  $dx, dy=38.8\text{mm}$ 、 $x$  および  $y$  方向のエレメント数は 25778 と仮定すると、アレーアンテナは 1km の矩形となる。図 2 にこのサイドローブ特性を示す。

#### 4. SPS と FSS/FS 間の D/U の干渉計算法

干渉計算モデルを図 3 に示す。図に示すように、FSS/FS および無線 LAN は GSO 上の SPS から干渉を受ける。

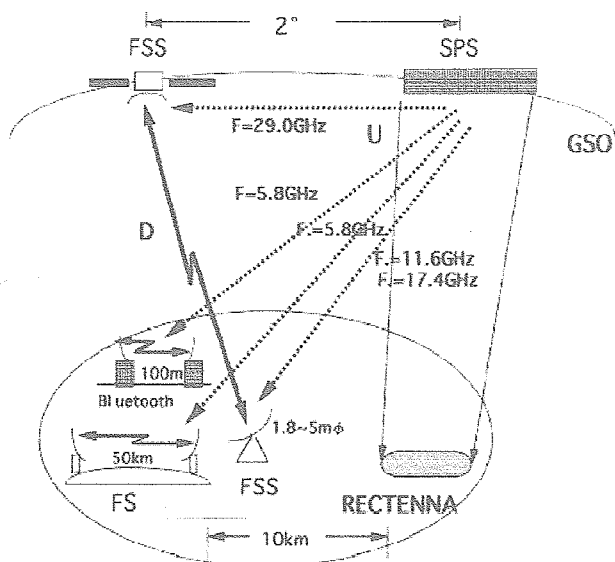


図3 FSS、W-LAN と SPS の干渉計算モデルの例

FSS 下り回線との干渉計算での所要信号電力(D)対不要信号電力(U)の比(D/U)は下式で求められる[6, 7]。

$$D=(P_{st}-P_{sb}-L_{stf}+G_{st})-L_{se}+(G_{er}-L_{fer}) \quad (1)$$

$$U=(P_{spst}-P_{spsh}-L_{spstf}+G_{spst})-L_{se}+(G_{er}-G_{\theta e}-L_{fer}) \quad (2)$$

ここで、

$P_{st}, P_{spst}$  ; FSS, SPS の送信電力[dBm],

$P_{sb}$  ; FSS 送信機のバックオフ[dB],

$P_{spsh}$  ; SPS 送信機の高調波電力レベル[dB],

$L_{stf}, L_{spstf}$  ; FSS, SPS の送信機給電分波損失[dB],

$G_{st}, G_{spst}$  ; FSS, SPS の送信アンテナ利得[dB],

$G_{\theta e}$  ; 角度  $\theta e$  方向の地球局受信アンテナサイドローブ利得[dB],

$L_{se}$  ; 自由空間損失[dB],

$G_{er}$  ; 地球局受信アンテナ利得[dB],

$L_{fer}$  ; 地球局給電分波損失[dB]を示している。

#### 5. SPS と FSS/FS 信号間の干渉計算例

##### 5.1 干渉計算の仮定

干渉計算を進める上での主な仮定は以下のような項目を考える。① SPS 送信機の高調波レベルはほぼ-70dBc を考える、② SPS 送信アンテナはパッチアンテナアレーを考える。③ FSS はインテルサットシステムを考え、地球局アンテナは 5.0m とする、④ FSS と SPS 間の共存のための適切なサービスエリア分離を考慮する。例えば、

10 kmのサービスエリア間の分離を仮定すると、SPS レクテナと FSS 地球局の間の衛星から見た分離角 ( $\theta$ ) は  $0.016^\circ$  となる。⑤ FSS と SPS の軌道分離角は2度を考える。⑥ FSS システムの所要 D/U は30 dB とする。⑦無線 LAN の例は、現在市販されているカード方式を想定する。

5.2 11.6GHz 帯での FSS との干渉計算例

この周波数帯は14/11GHz 帯の固定衛星サービス、特に、インテルサットで活発に使われている。干渉経路モデルを図4に示す。

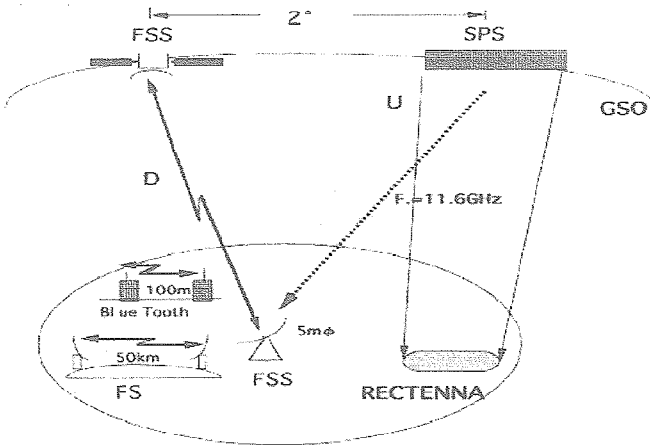


図4 FSS と SPS の干渉計算モデルの例

計算に使用した各種パラメータとしては下記の値を使用する。

**\*SPS 送信機の高調波レベル：**送信機に 5.8GHz 帯を使用した場合の第2倍高調波のレベルは、測定されていない。ここでは、2.45GHz の高調波レベルが $-70 \sim -80$  dBcであることを考慮して、 $-70.0$  dBcを用いる。

**\*SPS アンテナのサイドローブ特性：**SPS アンテナの主ビームに対して FSS 地球局の間の衛星から見た分離角 ( $\theta$ ) は  $0.016$  度となり、図2に示すパッチアレーの高調波特性パターン第2高調波の利得から、65dBを用いる。

**\*地球局アンテナサイドローブ特性：**FSS と SPS は2度ずれた位置にあるため、大型地球局サイドローブ特性  $32-25\log \theta$  を参照して、21.5dBを採用する。

**\*FSS 下り回線のパラメータ：**衛星送信 e. i. r. p. =36.4dBmを仮定して、衛星アンテナ利得、送信出力を推定する。

**\*地球局規模：**被干渉システムは5.0mのアンテナを使用したシステムを考える。

これらのパラメータと式(1)、(2)を適用して D/U を求めた回線設計表を表1に示す。表1に示すように所要干渉改善量は51.6dB 必要である。

| 項目       | 単位    | SPS (U) | FSS(D) |
|----------|-------|---------|--------|
| 周波数      | [GHz] | 11.6    | 11.6   |
| 送信電力     | [dBW] | 21.2    | 10.0   |
| 分波損失     | [dB]  | 10.0    | 1.0    |
| Back off | [dB]  |         | 7.0    |
| 送信アンテナ利得 | [dB]  | 65.0    | 34.4   |
| 送信 EIRP  | [dBW] | 76.2    | 36.4   |
| 自由空間損失   | [dB]  | 205.0   | 205.0  |
| 降雨減衰     | [dB]  |         | 10.0   |
| 受信アンテナ利得 | [dB]  | 21.5    | 49.7   |
| 分波損失     | [dB]  | 1.0     | 1.0    |
| 受信レベル    | [dBW] | -108.3  | -129.9 |
| D/U      | [dB]  | -21.6   |        |
| 所要 D/U   | [dB]  | 30.0    |        |
| 所要改善量    | [dB]  | 51.6    |        |

5.3 5.8GHz 帯無線 LAN との干渉計例

最近のブロードバンドネットワークの一例として、2.45GHz 帯を使用した無線 LAN が実用化されている。さらに周波数の混雑解消のために、5.8GHz 帯の無線 LAN の使用も進められており、今後は5.8GHz に移行するものと考えられる。この回線に SPS の5.8GHz が干渉することが考えられ、干渉評価が必要となる。

具体的な無線 LAN の例として、米国のモトローラ社で製品化しており、このパラメータを参考に計算を行う。干渉計算モデルと主要なパラメータを図5に示す。計算に使用した各種パラメータは、下記の値を使用する。

**\*SPS アンテナのサイドローブ特性：**SPS アンテナの主ビームに対して無線 LAN 局の衛星から見た分離角 ( $\theta$ ) は  $0.016$  度となり、図2に示すパッチアレーの5.8GHz の特性パターン利得から、75dBを用いる。

**\*無線 LAN の送信電力特性：**モトローラ社などで製作している無線 LAN の送信電力は100 mW, 10 mW などの種類がある。ここでは、100mW ( $-10$  dBW) の値を採用する。

**\*無線 LAN アンテナサイドローブ特性：**無線 LAN は垂直ダイポールまたは類似の線状アンテナを使用すると仮定し、その利得は3 dBを採用する。

**\*無線 LAN の自由空間損失：**無線 LAN の運用は100m以内と仮定し、87.7dBを使用する。

表2には、これらのパラメータを使用した干渉計算例を示す。計算の結果、所要改善量が約90 dB が得られ、共存はこのままでは難しいものと判断される。

表1 f=11.6[GHz]の干渉計算例.

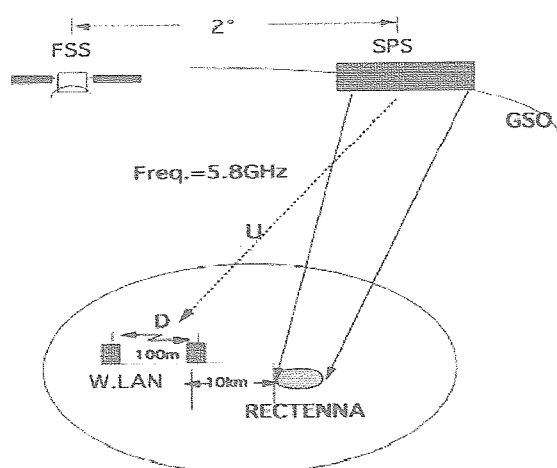


図5 無線LANとSPSの干渉計算モデルの例

表2  $f=5.8$  [GHz]の干渉計算例.

| 項目       | 単位    | SPS (U) | FSS (D) |
|----------|-------|---------|---------|
| 周波数      | [GHz] | 5.8     | 5.8     |
| 送信電力     | [dBW] | 98.3    | -10.0   |
| 分波損失     | [dB]  | 10.0    | 1.0     |
| Back off | [dB]  |         | 0       |
| 送信アンテナ利得 | [dB]  | 75.0    | 3.0     |
| 送信 EIRP  | [dBW] | 163.3   | -8.0    |
| 自由空間損失   | [dB]  | 198.8   | 87.7    |
| 降雨減衰     | [dB]  |         | 0       |
| 受信アンテナ利得 | [dB]  | 3.0     | 3.0     |
| 分波損失     | [dB]  | 1.0     | 1.0     |
| 受信レベル    | [dBW] | -33.5   | -93.7   |
| D/U      | [dB]  | -60.2   |         |
| 所要 D/U   | [dB]  |         | 30.0    |
| 所要改善量    | [dB]  |         | 90.2    |

## 6. D/U 値改善のための各種方策と確認実験

干渉の可能性の大きい FSS 方式下り回線、無線 LAN の SPS との共存を可能とするための D/U 値の改善方法として、下記が考えられる。

### 6.1 各種の干渉軽減策

#### ①. FSS 地球局とレクテナを地理的に離す方法

計算では FSS 地球局とレクテナの距離は 10km として、最悪ケースで計算しているが、実用化する場合は、地理的分離による干渉軽減が可能である。例えば、計算で使った 10km の地理的距離を、20km とすると、約 7dB の改善が可能である。

#### ②. エネルギー拡散技術の利用

衛星通信方式では、無変調キャリアの信号の送信は干渉を与える潜在性が非常に大きいため、エネルギー拡散の適用が無線通信規則 (RR) で義務付けられている。エ

ネルギー拡散技術の利用により、干渉軽減が可能となる。2MHz (p-p) の周波数偏移で 24~27dB の干渉軽減が可能である。

#### ③. 高調波阻止フィルタの利用

送信機出力側に 11.6GHz を阻止するための高調波阻止フィルタを設置することで干渉軽減が可能である。しかし、ストリップ線路を使用する場合は、線路の

$Q_0$  が低い回路であるが、誘電体共振器フィルタでは High-Q フィルタが実現されており、LPF, BPF として期待できる。

#### ④. FSS 衛星と SPS の軌道間隔を大きく取る方法

計算では、軌道間隔を 2 度として計算しているが、この値を大きくすれば、干渉軽減が可能である。地球局アンテナサイドローブ特性として、

$$G=32-25\log \theta \quad (3)$$

を用いると、2° から 4° とすることで、約 7.5dB の改善が期待できる。

しかし、静止衛星軌道の混雑は非常に厳しく、1~2 度スペーシングでお互いに調整を取りながらサービスを提供しているのが現実である。既存衛星が密集している状態では軌道間隔を大きく取るのは難しいものと考えられる。

#### ⑤. 所要 D/U 値を減少させる方法

干渉計算表では、所要 D/U 値としては 30 dB を仮定して計算を進めている。所要 D/U 値は、システム設計者が熱雑音との配分を考えて緩和することが可能となる。これにより干渉を軽減することが可能と考えられるが、どの程度の所要 D/U 値の低下が妥当であるかについて、6.2 で実験的に確認している。

#### ⑥ SPS 専用周波数化

D/U 値改善のための方策は限定されるため、SPS 周波数の専用化が望ましい。必要とする帯域は FSS などの帯域と比較すると狭くても良く、エネルギー危機解決の方策として ITU などでの議論とコンセンサスが必要であろう。

## 6.2 所要 D/U 値と干渉量の関係の実験的検討

### 討

2.45GHz 帯の電子レンジと市販の無線 LAN との干渉特性を実験的に測定し、妥当な所要 D/U 値を求めている。

#### 6.2.1 実験構成

図 6 に示す測定回路で、電子レンジからの干渉波を無線 LAN で受信し、その時のスループットを測定する。図 6 に示すように、無線 LAN の基地局 (アクセスポイント) は FTP サーバーに接続されており、無線 LAN 端末がサーバーからの信号を受信している。

一方、電子レンジからの 2.45GHz の干渉波が妨害を与

え、サーバーと LAN 端末の通信に劣化を与え、スループットが低下する。

スペクトラムアナライザーには 2.45GHz のアンテナを設置し、無線 LAN の信号と干渉波を同時受信し、2 波の D/U を測定する。

電子レンジはインバーター型、600W 出力であり、干渉レベルは刻々と変動しているが、干渉レベルの最も高いと想定される値と、図 7 の無線 LAN のピーク値のスペアナ上での差を D/U と定義している。変調波のスペクトラム分布の違いによる IRF(干渉軽減係数)は考慮していない。

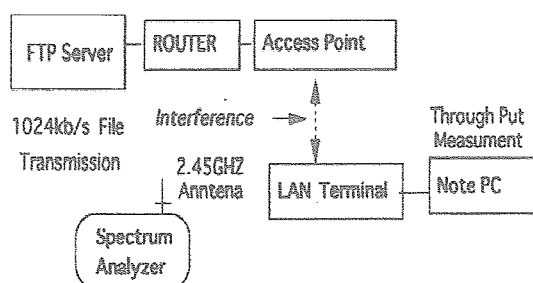


図6 無線LANと電子レンジによる干渉実験構成

図 7 は D/U 対スループットの関係を示して、この結果から、D/U=20dB と D/U=30dB のスループットの差は小さく、D/U=20dB 程度まで低下できるものと考えられる。

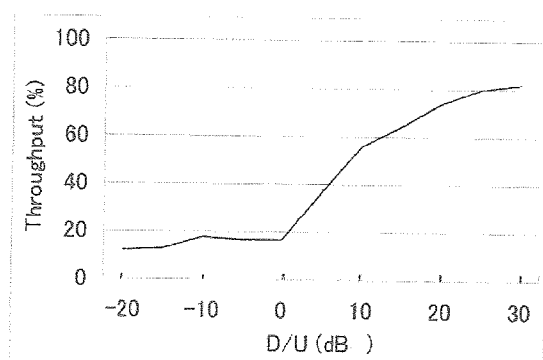


図7 電子レンジと無線 LAN の D/U 対スループットの関係

## 7. 2.45GHz と 5.8GHz の方式的な比較

文献[7]で 2.45GHz の干渉評価を行い、本報告で 5.8GHz の帯干渉特性が計算できた。干渉特性の観点から両周波数を比較し、表 3 に両周波数の特徴、欠点を示している。

表3 SPS周波数として2.45GHzと5.8GHzの周波数に

### 対する特徴、欠点

| 項目                | 2. 4 5 GHz z                        | 5. 8 GHz z                          |
|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ①送信管              | 電子レンジ用<br>マグネトロンで<br>使用、            | 大量生産機種<br>なし、                       |
| ②FSS との干<br>渉     | 12. 25GHz 帯の<br>干 渉（ 軽 減 量<br>28db) | 11. 6GHz 帯の<br>干渉(干渉軽減量<br>51. 6dB) |
| ③無線 LAN と<br>の干渉  | 干 渉 軽 減 量<br>85dB                   | 干 渉 軽 減 量<br>90. 2dB                |
| ④電波天文研<br>究業務との干渉 | 4. 9GHz 帯への<br>干渉の可能性有、             | 干 渉 問 題 な<br>し、                     |
| ⑤装置サイズ            | 1                                   | 1/2～1/4                             |
| ⑥レクテナサ<br>イズ      | 1                                   | 1/4                                 |
| ⑦FS との干渉          | 問題なし                                | 問題なし                                |
| ⑧無線 LAN の<br>使用台数 | 大                                   | 小                                   |
| ⑨周波数専用<br>化       | <u>抵抗大</u>                          | <u>やや楽</u>                          |

8. あとがき：

5. 8GHz 帯を使用した SPS システムが FSS、無線 LAN システムに与える干渉評価について検討した。この検討に必要な干渉計算式を明らかにし、送信機の高調波特性は、マグネトロンの高調波実測値を用い、アンテナの高調波モードについては、パッチアンテナアレーを想定して、高次モードの利得を計算し、これらの特性を使用して計算を実施した。

この結果、以下の結果が明らかになった。

(1) FSS の 14/11 GHz 帯の下り回線の周波数帯域内に干渉を与える第 2 高調波 (11.6GHz) の所要 D/U からの改善量として、約 52 dB となる。この干渉に対しては対策が必要である。

(2)無線 LAN の使用周波数 (5.8GHz 帯) に、基本波が干渉を与える可能性がある. 計算の結果、所要 D/U から改善量として、約 90dB となる。

(3) 干渉軽減対策を検討し、特に、所要 D/U の軽減のために、どの程度まで低下できるかを、実験的に求め、D/U=20dB 程度まで低下できることを明らかにした。

(4) 無線 LAN との干渉は厳しく、SPS 用としての周波数専用化が必要であると考えられる。すなわち、無線 LAN での周波数設定時に、5.8GHz 帯を避けた周波数配置とすることにより干渉はかなり軽減でき、SPS と共存できるものと考えられる。

今後、5.8GHz が使用された時の FSS、無線 LAN 以外の業務への干渉評価、軽減法などについて検討を続ける必要がある。

謝辞：本研究は、文部科学省科学研究費補助金 (No. 13650422) の一環として行われている。

#### 文献：

[1] 初田、上野、“太陽発電衛星 (SPS) と固定衛星業務 (FSS) / 固定無線業務 (FS) 回線との検波干渉評価”、電子情報通信学会、信学技報、SANE2001-80, pp. 35-42, 2001/11

[2] H. Matsumoto, “Research on Solar Power Station and Microwave Power Transmission in Japan : Technology and Strategy”, 2001 Asia-Pacific Radio Science Conference, U1-02, pp. 6-9, 2001/08.

[3] J. O. McSpadden, “The Current Capabilities of the WPT Technology”, 2001 Asia-Pacific Radio Science Conference, U1-03, pp. 14-17, 2001/08.

[4] T. Hatsuda and K. Ueno, “Compatibility with Radio Communications - Interference Assessment to Space and Terrestrial Systems-”, 2001 Asia-Pacific Radio Science Conference, U1-06, pp. 25-28, 2001/08.

[5] 上野、初田、“太陽発電衛星 (SPS) 送電アンテナの高調波放射特性”、電子情報通信学会、信学技報、SANE2001-80, pp. 29-33, 2001/11

[6] T. Hatsuda、Y. Motozumi, “Theoretical and Measuring Results of Interferences between Fixed-Satellite and Terrestrial Radio Relay Services at 4 and 11GHz Bands”, IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems (AES), Vol. 34, No. 1, pp. 23-32, 1998/01.

[7] T. Hatsuda, “Packet communication Ultra-Small Aperture Terminal System for the Hokkaido Integrated Telecommunication Network”, IEEE Trans. on MTT, vol. 43, No. 7, pp. 1692-1698, 1995/07.