

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月24日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560405

研究課題名（和文） 21GHz帯衛星放送の大容量化技術及び降雨減衰対策技術の研究

研究課題名（英文） Realization of high-capacity 21GHz band satellite broadcasting and rain-induced attenuation countermeasure technologies

研究代表者

福地 一 (FUKUCHI HAJIME)

首都大学東京 システムデザイン研究科 航空宇宙システム工学域

研究者番号：90358820

研究成果の概要（和文）：21GHz帯衛星放送の大容量化を実現する手段として、多値変調方式と直交偏波共用方式を取り上げ降雨時の品質劣化をシミュレーションで実施した。その結果多値変調方式の有効性、降雨減衰対策の必要性が明らかとなった。降雨減衰対策として、ダイバーシティ技術の効果を日本及びアジアでの降雨強度、降雨減衰観測結果をもとに定量的に評価し、ダイバーシティ技術の有効性を示した。

研究成果の概要（英文）： We propose 16- and 32-ary modulation schemes and dual-polarized scheme as methods to increase satellite broadcasting capacity significantly. Link performance is simulated using MATLAB/SIMULINK software assuming modulated signal propagates in rain-filled medium. We noticed the above methods are available if attenuation countermeasure technology works effectively. As for attenuation countermeasure technology, we evaluated quantitatively diversity methods using rainfall rate and attenuation data measured in Japan and Asian countries.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,900,000	1,170,000	5,070,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：通信方式（無線、有線、衛星、光、移動）、衛星放送、降雨減衰、ミリ波帯無線

## 1. 研究開始当初の背景

21GHz帯衛星放送システムは、その帯域の広さ等から、高速・大容量の情報通信システムとなることがあきらかであり、通信・放送融合を背景に、種々の情報通信サービス応用が検討されてきている。ただし、その実用化検討にあたっては、現行の衛星放送用周波数帯である12GHz帯に比して周波数が高いために、対流圏気象粒子、特に降雨による電波伝搬特性の劣化の把握と、その回線品質に及ぼす影響の評価と品質劣化軽減技術の

確立が大前提となる。残念ながら、この降雨対策技術の未成熟さが大きな理由となり、また、高速・大容量衛星情報通信サービスのイメージが定まらないことも手伝って、2007年からの周波数帯解禁にも係わらず、世界で21GHz帯衛星放送システムの実用化への動きは未だみられていない。

日本は、スーパーハイビジョンなどの高度放送コンテンツ技術や降雨減衰対策技術について成果を挙げており、また衛星放送の実用化を世界に先駆けて成功させた国でもあ

ることから、この2.1GHz帯衛星放送システムを世界に先駆けて実用化させることが期待されている。特に、降雨減衰対策技術について進展が図れば、日本のみならず、強雨地域であるが故に現行衛星放送サービスさえも十分に享受できていないアジア地域の国々への技術的貢献も大いに期待されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、国際電気通信連合において、次世代衛星放送システム用の下りリンク周波数として割り当てが決められている2.1GHz帯を用いた衛星放送システムの高速度・大容量化技術及び降雨等の気象粒子による回線品質劣化を補償する対策技術を提案し、その効果について定量的に評価することを目的とする。

これらの技術は2.1GHz帯衛星放送システムのみならず、1.2GHz帯衛星放送でさえも降雨時に高品質な受信ができないことが多いアジア多雨地域での降雨減衰対策技術としても有益であり日本のアジア諸国への技術貢献にも資するものである。

## 3. 研究の方法

(1) 本システムの高速度・大容量化は、直交偏波共用と多値変調の組み合わせで実現するものとし、衛星中継器の帯域制限や非線形性による性能劣化、降雨や上層の氷等、非球形気象粒子による減衰や交差偏波識別度(XPD)劣化に伴う偏波間干渉増加による性能劣化を主としてコンピュータシミュレーションにより実施する。すでに、変調方式として一般的なQPSKを用いた場合のミリ波帯直交偏波共用回線の品質検討は研究代表者らによって論文化されているが、変調方式を8PSK, 16APSK, 32APSK等に拡張して、直交偏波共用と多値変調方式でどこまで高速度・大容量化が図れるか品質劣化補償技術の検討も含めて定量的に解析する。

(2) 降雨減衰等、電波伝搬に伴う回線品質劣化対策技術は、衛星放送上りリンク(ファイダリンク)に適応可能な①**サイトダイバーシチ技術**を取り上げる。衛星放送下りリンクに適用する対策技術として、衛星搭載アンテナにマルチビーム方式あるいは適応ビーム成形方式を採用し、地上降雨域にアダプティブに衛星送信電力を増力する②**衛星送信電力制御方式**(図1参照)と、情報の一部を時間差をおいて複数回送信する③**タイムダイバーシチ方式**を取り上げる。これらの降雨減衰対策技術の効果を評価するために、日本国内で観測された降雨強度、降雨減衰データを使用する。さらに、アジア多雨地域の降雨減衰観測例として、タイ、バンコクで観測された衛星タイコム2号、3号の

受信信号強度データを解析する。

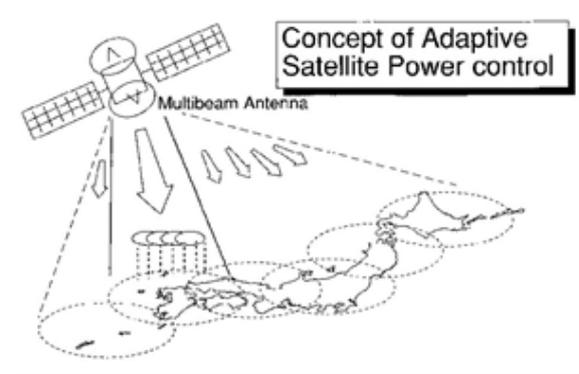


図1 衛星送信電力制御方式のイメージ

## 4. 研究成果

### (1) 多値変調方式の適用

変調とは電波に情報を乗せる操作である。本研究では先行研究に次ぎ、16値と32値のQAM, APSKを扱う。これらは振幅変化と位相変化の並用で変調を行う。図2に16QAM及び16APSKのコンステレーションを示す。APSK変調については、内外の信号点の振幅比や位相差によってビットエラー特性(BER特性)が異なるので、APSK変調方式についてはそれらの最適化を行ったうえでシミュレーションを実施している。

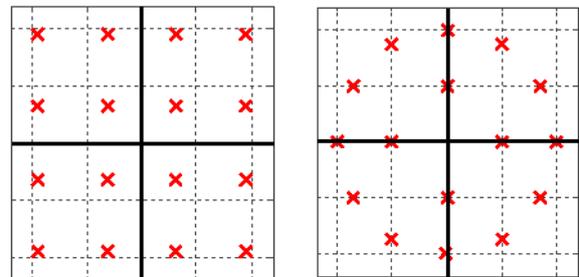


図2 16QAM及び16APSKのコンステレーション

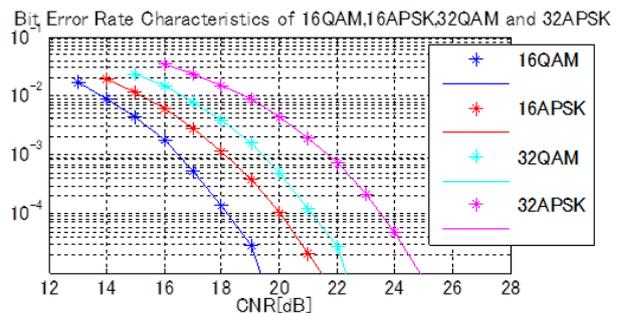


図3 各変調方式のBER特性

図3は検討した変調方式のBER特性である。ここでは、直交偏波共用回線を採用するため、同様な変調方式の信号が干渉源として存在する場合をシミュレートした。干渉は降雨が球形でないために生ずる交差偏波識別度(XPD)劣化が原因とし、降雨減衰とXPDの関係式を用いて降雨時のBER特性を求めた。この時、場所を東京とし、適切な晴天時CN比を仮定している。図4は、32APSKの変調方式のBERの累積分布を示す。図中の $\sigma_0$ は個々の雨滴の傾きのばらつきを示す量で実際の雨では30度程度とされている。この図から、「偏波共用なし」の場合と「 $\sigma_0=30$ 度」の場合とでBER累積分布に大きな違いがないことがわかる。このことは、偏波共用を行っても降雨による交差偏波識別度劣化はそれほどBERの劣化に影響しないことを意味する。BER特性は、CN比を直接減ずる降雨減衰によって大きく劣化する。つまり、降雨減衰対策さえ成功すれば偏波共用によって伝送容量を倍加させることがこれらの変調方式でも可能であることがわかった。

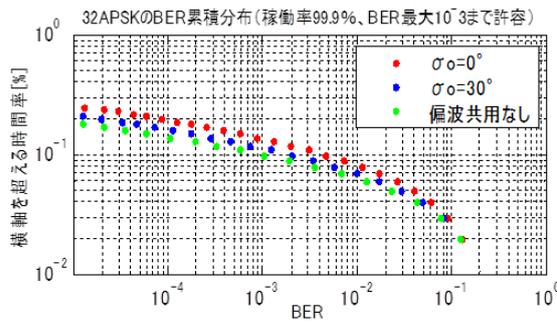


図4 BER特性の累積分布(32APSK変調)

## (2) 降雨減衰対策技術

### ① 降雨減衰測定システムの構築

降雨減衰の時系列を測定するために、

- ア 実験衛星 WINDS 信号受信システム
- イ 放射計による天空雑音測定システム

を整備した。天空雑音測定システムは、図5に示す簡易型の放射計で天空の任意の方向からの降雨雑音を測定できる。ここでは、2周波数(10及び36GHz)の放射計を用いて、アのWINDS方向の観測を実施した。これらの2周波数の雑音温度からWINDSの信号の周波数における降雨減衰を推定し、実測した降雨減衰との比較を通じて簡易放射計による降雨減衰推定の有効性を確かめた。

図6は、実測降雨減衰と簡易放射計による降雨減衰推定結果の比較である。10GHz放射計による降雨減衰推定結果はWINDS信号による実測降雨減衰とも良く一致し、RMS誤差はこの間の観測結果に対して0.33dBと

なっている。これは、10GHz放射計でWINDS信号周波数18GHzの降雨減衰を0.5dB以下の誤差で推定可能であることを意味し、この簡易放射計が降雨減衰の推定に有効であることがわかった。さらに、放射計は任意の方向の雑音を計測できることから、任意の方向に対する降雨減衰を推定できる利点を有している。



図5 10GHz放射計の外観写真

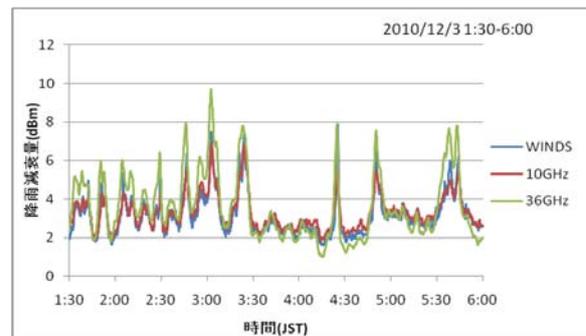


図6 放射計による降雨減衰推定例

### ② 1分降雨強度データによるサイトダイバーシチ効果の評価

気象庁から提供された関東地方の13箇所で観測された1分毎の降雨強度データをもとに、サイトダイバーシチによる降雨減衰対策の効果を評価した。ダイバーシチの効果を図7の赤矢印に示すダイバーシチゲインで評価する。つまりダイバーシチゲインとは、2ヶ所のうち降雨強度の小さい場所の降雨強度に対応する降雨減衰が回線品質劣化の原因とするもので、等価的に1箇所のときに比べて降雨強度が小さくなったことになる。累積分布上である累積時間率に対する降雨強度の減少量をダイバーシチゲインとしている。

ここでは、13箇所のうちの任意の2ヶ所でサイトダイバーシチを実施したとして、2ヶ所の距離に対する空間相関係数を求め、その距離依存性を式でモデル化した。そのモデル化から求められる、ダイバーシチゲインと

実測のダイバーシチゲインとを比較してよく一致することを確かめた。さらに、衛星軌道や周波数(2.2GHz)を仮定して降雨強度を降雨減衰に変換してダイバーシチゲインを算出し、従来国際電気通信連合(ITU)で推奨されている実験式との比較を行った。図8は距離に対するダイバーシチゲインの変化を回線稼働率99, 99.9, 99.99%について示したもので、実線で示したモデルと実測結果が良く合っていることがわかる。図9は、ITUの実験式から求められる結果を太い実線で、我々のモデル式の結果を細い実線で示したものである。稼働率が小さい場合(99及び99.9%)にはITUと我々のモデルが良くあうことがわかるが、稼働率99.99%の場合にはおおきな差があることがわかる。この差異については今後検討が必要とおもわれる。

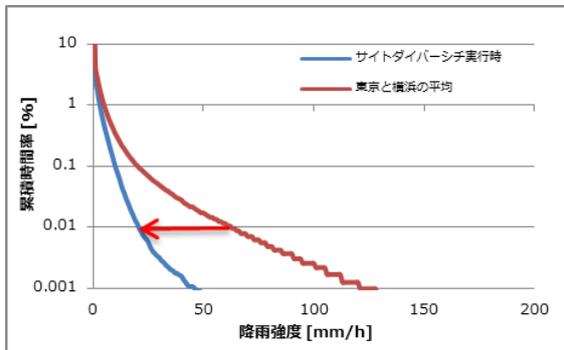


図7 ダイバーシチゲインの考え方

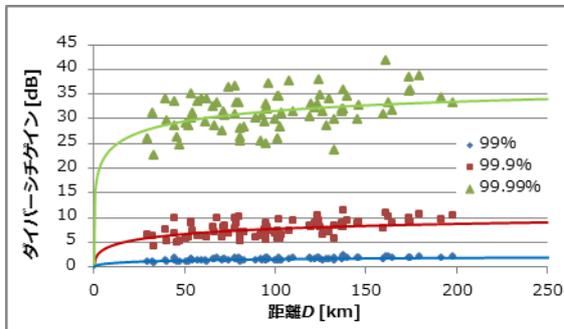


図8 距離とダイバーシチゲイン

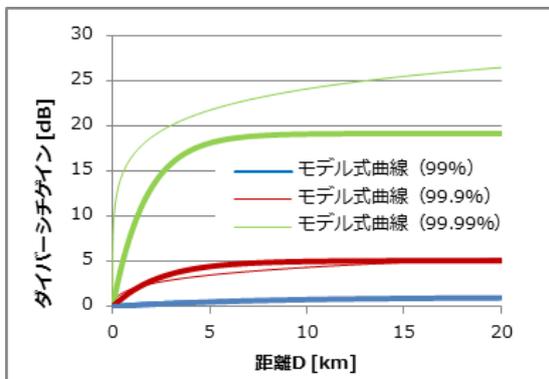


図9 モデル式とITU実験式の比較

③ 降雨減衰データによるタイムダイバーシチ効果の評価

衛星放送ダウンリンクの降雨減衰対策としてタイムダイバーシチがある。タイムダイバーシチとは図10に示すように、情報の一部aを時間遅れTを持たせて再送する方法で、a=1であれば再放送となる。再送された情報のうち、どちらか降雨減衰の被害を受けていない方を受信情報とするダイバーシチ法の一つである。

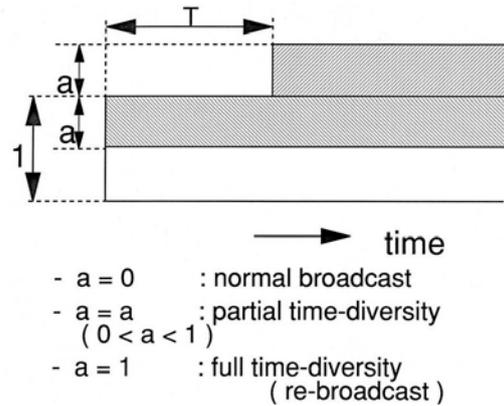


図10 タイムダイバーシチ法のイメージ

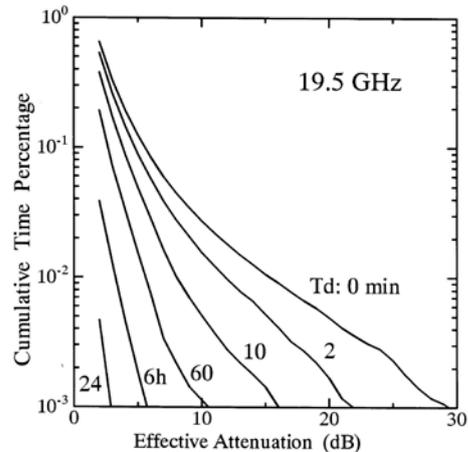


図11 タイムダイバーシチの効果(日本)

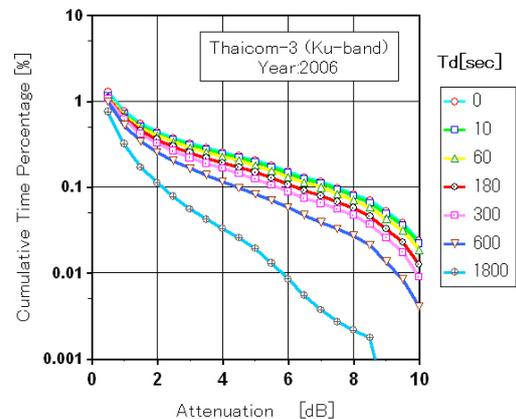


図12 タイムダイバーシチの効果(タイ)

図11は、日本の鹿島で8年間に観測された19.5GHzの衛星電波の降雨減衰累積分布である。図では、ダイバーシチを行わない場合の分布に加えて、タイムダイバーシチを実施し、時間遅れを2分から24時間とした場合の等価的な累積分布を示している。累積時間率が小さな領域ではたとえ短い時間遅れでも大きなダイバーシチゲインが得られていることがわかる。

図12は同様にして、アジア多雨地域であるタイ、バンコクで1年間に観測された12GHzの衛星電波の降雨減衰累積分布である。同様にして、タイムダイバーシチを行わない場合と行った場合とを比較すると、数分の時間遅れでも数dBのダイバーシチゲインが得られることがわかる。このように、アジア多雨地域でもタイムダイバーシチによって累積時間率の小さな領域で大きなダイバーシチゲインが得られることがわかる。

タイムダイバーシチは、21GHz帯衛星放送のような容量に余裕がある場合には強力な降雨減衰対策といえ、すでにITUで衛星放送用周波数として割り当てられている21GHzより大きな42、74GHz帯の場合には降雨減衰対策として有力な候補となる。

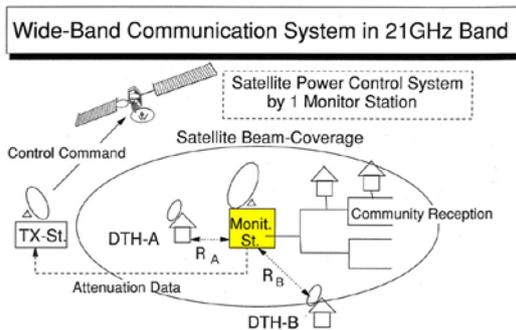


図13 1局モニタ法衛星送信電力制御

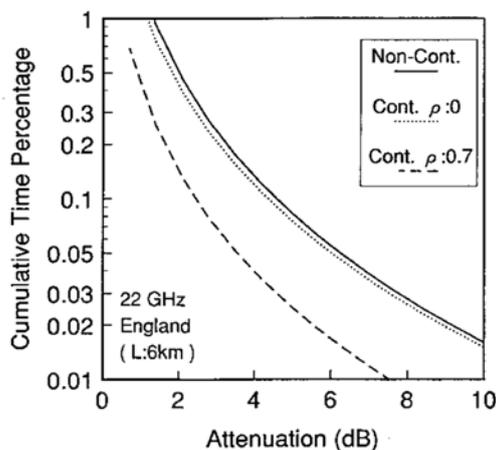


図14 衛星送信電力制御の効果

#### ④ 衛星適応送信電力制御の評価

衛星送信電力制御法は、図1にイメージを示すように、降雨が生じているエリアへの送信電力を増加させる方法である。原理はわかりやすいが、以下の課題がある。

ー増力ビームを実現させる衛星搭載アンテナ等のハードウェアの開発

ー増力させる電力をどのように決めるか

前者については、NHK放送技術研究所において、アレイアンテナによる増力ビームの形成について研究が進められており、21GHz帯衛星放送を念頭に置いた開発へと研究が進展している。後者については、いくつかの方法があり、ビーム内降雨減衰をなんらかの方法で知り、そのピーク値で増力する方法、平均値で増力する方法、ビーム内にモニタ局を用意し、その局で観測された降雨減衰量で増力する方法、固定量の増力を行う方法などの方法がある。

図13は、上述の方法のうち、ビーム内にモニタ局を1局用意し、その降雨減衰量で衛星送信電力を制御する1局モニタ法のイメージ図である。当然、モニタ局の場所は、衛星の送信能力の制限範囲で完全な降雨減衰補償がされる。しかし、モニタ局から離れた受信者DTH-A、DTH-Bについては、どのような効果が期待できるかが十分検討されていない。定性的には、モニタ局に近いDTH-A受信者の方が、遠いDTH-B受信者より効果的な降雨減衰補償がされることが予想される。図14は、このような1局モニタ法による衛星適応送信電力制御を実施したときの実効的な降雨減衰累積分布を示している。周波数は22GHzとしている。この図を求めるにあたって、英国での降雨強度観測結果を用いて、2ヶ所の降雨強度結合確率分布を2次元の対数正規分布で近似し、2ヶ所の降雨強度の類似度を空間相関係数 $\rho$ で定量化している。この場合、 $\rho$ はモニタ局の地点と受信者の地点の降雨強度の相関係数である。図から、空間相関係数 $\rho$ が0.7と大きい場合には破線で示すように、大きなダイバーシチゲインを得ることができる。しかし、 $\rho$ が0、すなわち無相関の場合には、ほとんどダイバーシチゲインが得られないことがわかる。これは、前述のモニタ局に近ければ大きな降雨減衰補償効果が得られるという定性的な結果を定量的に裏付ける結果となっている。

衛星送信電力制御法は、日本及びイタリアのみが研究している状況であり、降雨強度の空間相関特性を考慮して、最適なビームサイズを求めること、日本全体の降雨状況を解析して最適な増力ビーム数、増力量を求めること、前述の増力情報のフィードバック法として何が最適かを求めることなど、多くの課題を残している。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 福地 一、”高速衛星放送システム実現のための降雨減衰対策技術 –アジア多雨地域でのタイムダイバーシチ効果の検討”、TelecomFrontier, 査読無、No.70, pp.34-49, Feb. 2011.

[学会発表] (計 10 件)

- ① H.Sasaki and H.Fukuchi, “Time series estimation of rain-induced attenuation using simple dual-frequency radiometer”, AIAA ICSSC2011, 28 Nov.-1 Dec. 2011, Nara Japan.
- ② H.Fukuchi, “Spatiotemporal properties of rainfall rate and rain-induced attenuation for attenuation mitigation technologies”, AIAA ICSSC2011, 28 Nov.-1 Dec. 2011, Nara Japan.
- ③ H.Fukuchi, “Effects of raindrop size distribution on millimeter wave attenuation, XPD and their relations”, International Symposium on Antennas and Propagation ISAP2011, Oct.25-28, 2011, Jeju Korea.
- ④ H.Fukuchi, N.Abe, T.Takahashi, and T.Asai, “Ka-Band Satellite Communication Experiments and Rain Attenuation Measurements using WINDS”, Int. Conf. on Inf. Comm. And Signal Processing (ICICS2009), Dec.8-10 2009, Macau, China.

[その他]

ホームページ

<http://www.sd.tmu.ac.jp/~rsl/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

福地 一 (フクチ ハジメ)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：90358820

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし