

短波帯デジタル固定局作業班
第 2 回会合資料

短波帯デジタル固定局の 実測データの分析と VOACAP

2023 年 1 月 30 日
作業班 事務局

目次

1	はじめに.....	3
2	送信・受信データの分析.....	4
2.1	実験試験局に関する基本事項.....	4
2.1.1	送信局と受信局.....	4
2.1.2	定義など.....	4
2.2	実験試験局の疎通率.....	5
2.2.1	データ取得に関する前提事項.....	5
2.2.2	実験試験局の疎通率.....	5
2.3	実験試験局と VOACAP における疎通率.....	7
2.4	周波数に関する考察.....	8
3	VOACAP の有用性.....	9
3.1	有用性を評価する上での方法論.....	9
3.2	VOACAP の疎通率の有効性.....	9
3.3	VOACAP 入力パラメータ.....	10
3.3.1	雑音.....	10
3.3.2	最小検出角.....	10
3.3.3	必要疎通率.....	10
3.3.4	必要 SNR.....	10
3.3.5	マルチパス偏差.....	10
3.4	当社の実験試験局に関する方法論.....	11
3.5	VOACAP の予測と実験試験局の結果の比較.....	11
3.6	実験試験局の結果と VOACAP の予測の比較を改善するための考察.....	14
3.7	実験試験局からの VOACAP の有用性の分析.....	14
3.8	VOACAP が有用でない点.....	15
3.9	結論.....	15

図一覧

Figure 2-1	疎通率(2022 年 4 月).....	5
Figure 2-2	疎通率(2022 年 5 月).....	5
Figure 2-3	疎通率(2022 年 6 月).....	6
Figure 2-4	疎通率(2022 年 7 月).....	6
Figure 2-5	疎通率(2022 年 8 月).....	6
Figure 2-6	疎通率(2022 年 12 月).....	7
Figure 2-7	疎通率(2023 年 1 月).....	7
Figure 2-8	疎通率の比較(9 MHz 帯)(2022 年 5 月).....	8
Figure 2-9	周波数の数と疎通率.....	8
Figure 3-1	VOACAP と実験試験局の結果(2022 年 1 月).....	11
Figure 3-2	VOACAP と実験試験局の結果(2022 年 4 月).....	11
Figure 3-3	VOACAP と実験試験局の結果(2022 年 5 月).....	12
Figure 3-4	VOACAP と実験試験局の結果(2022 年 6 月).....	12
Figure 3-5	VOACAP と実験試験局の結果(2022 年 7 月).....	12
Figure 3-6	VOACAP と実験試験局の結果(2022 年 8 月).....	13
Figure 3-7	VOACAP と実験試験局の結果(2022 年 12 月).....	13
Figure 3-8	VOACAP と実験試験局の結果(2023 年 1 月).....	13
Figure 3-9	VOACAP (Windows 版)の結果(2022 年 5 月).....	14

1 はじめに

本報告書の主な目的は、短波帯デジタル固定局のための計画ツールとしての VOACAP の有用性について考察を行うことです。そのため、本報告書は、以下の点を提示しています。

1. データコム社の短波帯デジタル固定局(以下、「実験試験局」とします。)による送信・受信データの分析
2. VOACAP が短波帯デジタル固定局の計画ツールとして有用かどうかの分析とその考察

2 送信・受信データの分析

2.1 実験試験局に関する基本事項

2.1.1 送信局と受信局

送信局は、実験試験局として免許(識別番号:JS2RA)が与えられています。実験試験局は、59 m のタワーから、10 kW の空中線電力で、2 本のアンテナを利用して、33.9 度の方向に送信しています。このアンテナは、次の通りです。

- 対数周期アンテナ(ログペリオディックアンテナ)(6～10MHz 帯用)
- 対数周期アンテナ(ログペリオディックアンテナ)(9～30MHz 帯用)

受信局は、米国イリノイ州に位置しています。受信局では、以下のアンテナを利用しています。

- 対数周期アンテナ(ログペリオディックアンテナ)(10～30MHz 帯用)
- 対数周期アンテナ(ログペリオディックアンテナ)(6～10MHz 帯用)(下のものと位相同期されている)
- 対数周期アンテナ(ログペリオディックアンテナ)(6～10MHz 帯用)

2.1.2 定義など

実験試験局は、1 秒間の搬送波(CW)を送信した後、BPSK で変調された 2 つのメッセージ(各 8191 ビット長)を送信しています。この送信は、次のような諸元となっています。

- 空中線電力:10 kW
- 占有周波数帯幅:5.5 kHz¹

実験試験局のこの変調方式では、必要信号対雑音比(SNR)は 22dB となっています。この数値は、加法的白色ガウス雑音チャンネル(AWGN²)における、信号検知レート 90%に対応しています。

VOACAP の予測と実験試験局のデータとを比較するために、(VOACAP の予測と実験試験局のデータとを比較するための指標として)この SNR を採用いたしました。

VOACAP は、METHOD 30³という仕組みを利用して、ある UTC 時における、ある暦年、暦月、周波数における予測疎通率を計算します。

疎通率の数値は、必要 SNR を超える SNR が得られる日数の割合にて表示されます。例えば、疎通率が 90%とは、 $0.9 * 30 = 27$ 日間で、必要 SNR を超えると予測されるという意味になります。

なお、マイクロ波帯の固定通信回線のような無線技術では、暦月中に何分間の稼働をするかという観点からの疎通率の表示をすることができますが、VOACAP はこのような観点からの疎通率の表示はせず、また、することができません。

各時、各暦月、各年における SNR による疎通率(以下、「疎通率」とします。)を、ある周波数で送信した全信号の中で、22dB を越えたものの割合を計算することによって、求めました。

¹ 占有周波数帯幅は、現行の電波法を遵守するように、決定された。この詳細については、作業班の議論(占有周波数帯幅)について(2022/12/27 付)を参照ください。

² AWGN - https://en.wikipedia.org/wiki/Additive_white_Gaussian_noise

³ Using VOACAP Method 30 - <https://www.voacap.com/itshfbc-help/method30.html>

2.2 実験試験局の疎通率

2.2.1 データ取得に関する前提事項

- 2022 年 12 月以前： データ取得 (調査検討会と同じ形式で、実験試験局で行ったデータ取得のこと。以下同じ。)は、各周波数当たり、1 時間に 20 回。
- 2022 年 12 月以降 (現在まで)： データ取得は、各周波数当たり、1 時間に 1 回。

2.2.2 実験試験局の疎通率

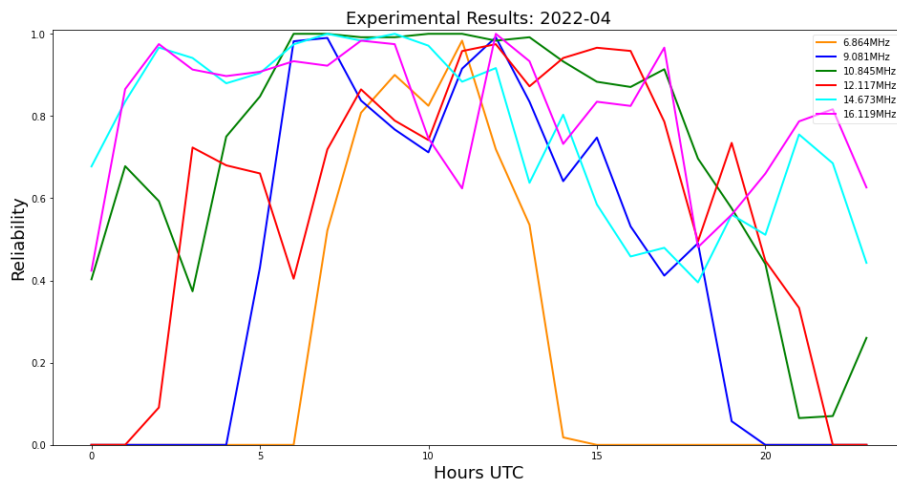


Figure 2-1 疎通率(2022 年 4 月)

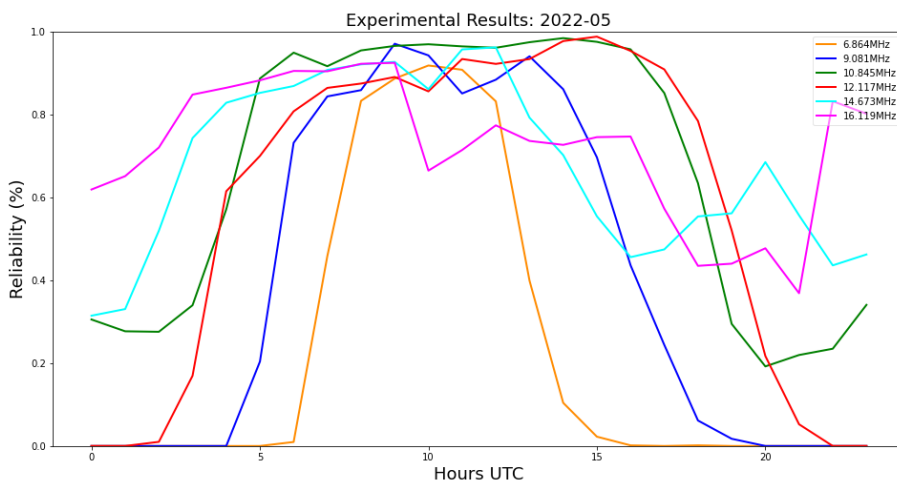


Figure 2-2 疎通率(2022 年 5 月)

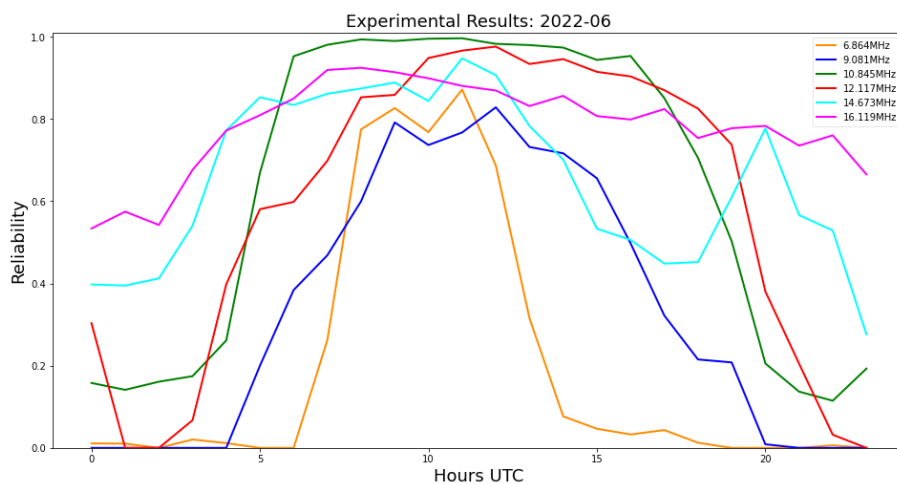


Figure 2-3 疎通率(2022 年 6 月)

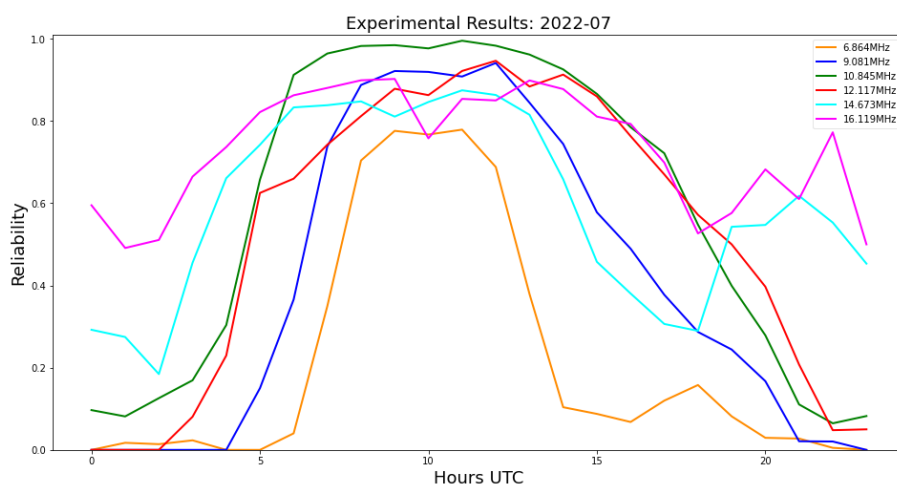


Figure 2-4 疎通率(2022 年 7 月)

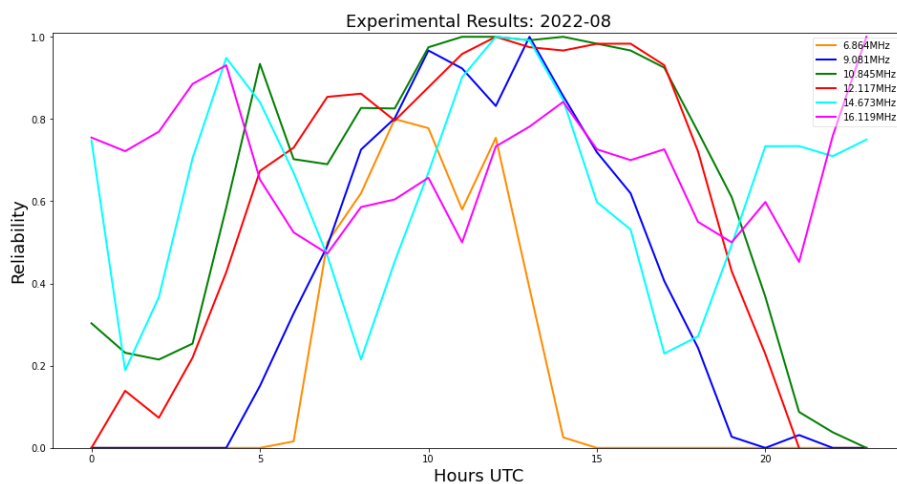


Figure 2-5 疎通率(2022 年 8 月)

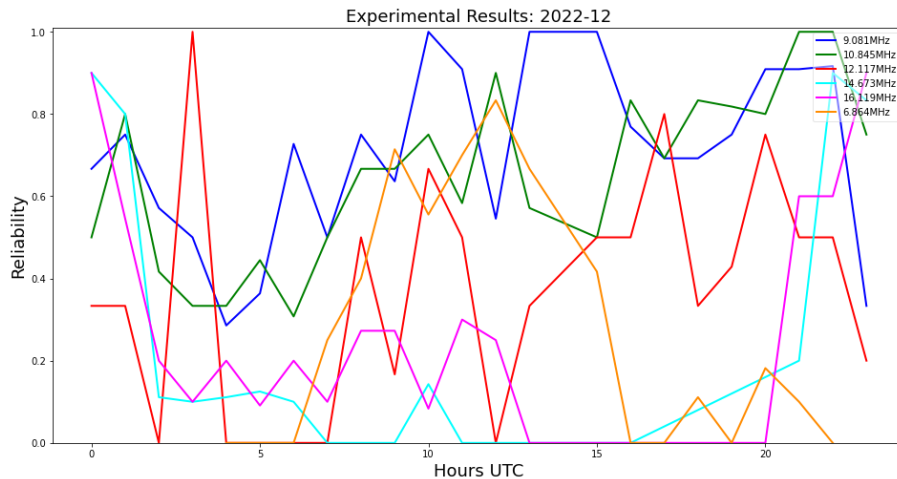


Figure 2-6 疎通率(2022 年 12 月)

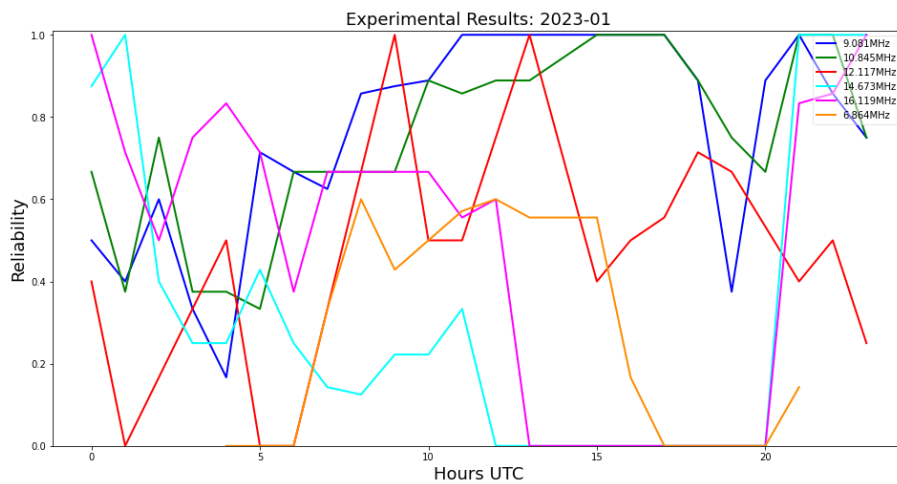


Figure 2-7 疎通率(2023 年 1 月)

2.3 実験試験局と VOACAP における疎通率

下図は、実験試験局の結果を、同一時期の VOACAP の予測と重ね合わせて表示した 1 例です。実験試験局の結果が、VOACAP の予測結果と非常に合致していることが分かります。

これによって、VOACAP が、短波帯デジタル固定局のある周波数での予測をする上で、有用なツールであると言えます。

(別の期間と周波数での類似の図については、第 3.5 節で提示しています。)

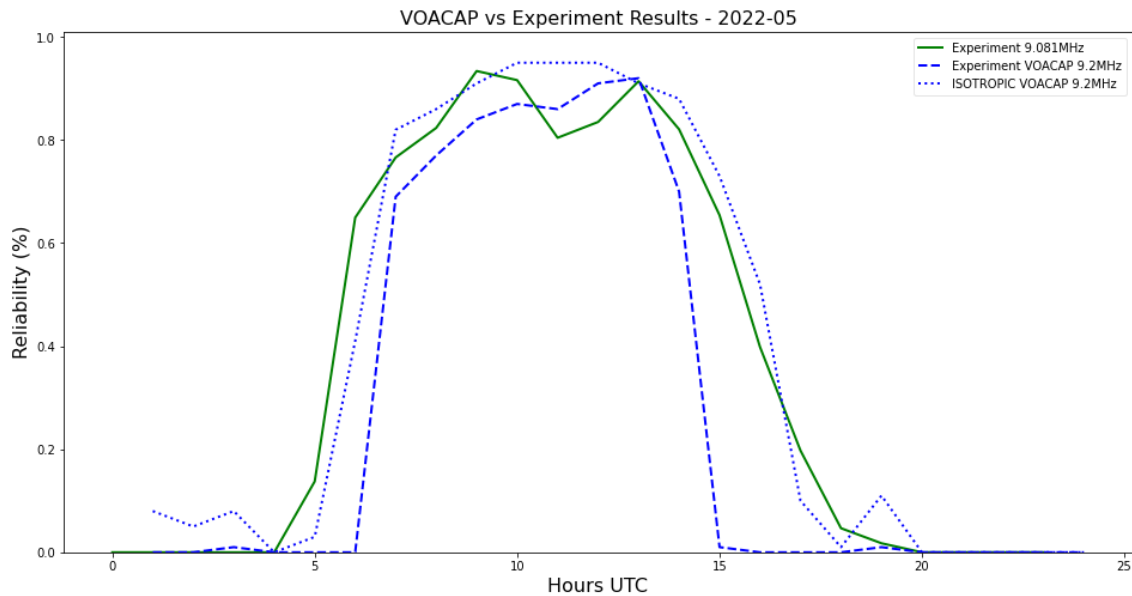


Figure 2-8 疎通率の比較(9 MHz 帯) (2022 年 5 月)

2.4 周波数に関する考察

下図では、ある運用期間において、利用できる周波数の数を 1 個から 2 個に、そして 2 個から 3 個に増やすことによって、疎通率が大幅に増加することが分かります。しかし、利用できる周波数の数を 3 個や 4 個にしても、さらに良い疎通率を得ることはできるものの、この周波数の追加は、実質的に、疎通率の改善とはなっていません。

下図では、各 UTC 時に対して、

1. C/N0 を利用して、最適な周波数を決定しました。
2. その周波数での全てのサンプルを利用して、疎通率の中央値を算出しました。
3. その疎通率の中央値を描画しました。

また、類似の結果を、VOACAP の METHOD30 を利用しても、得ることができます。

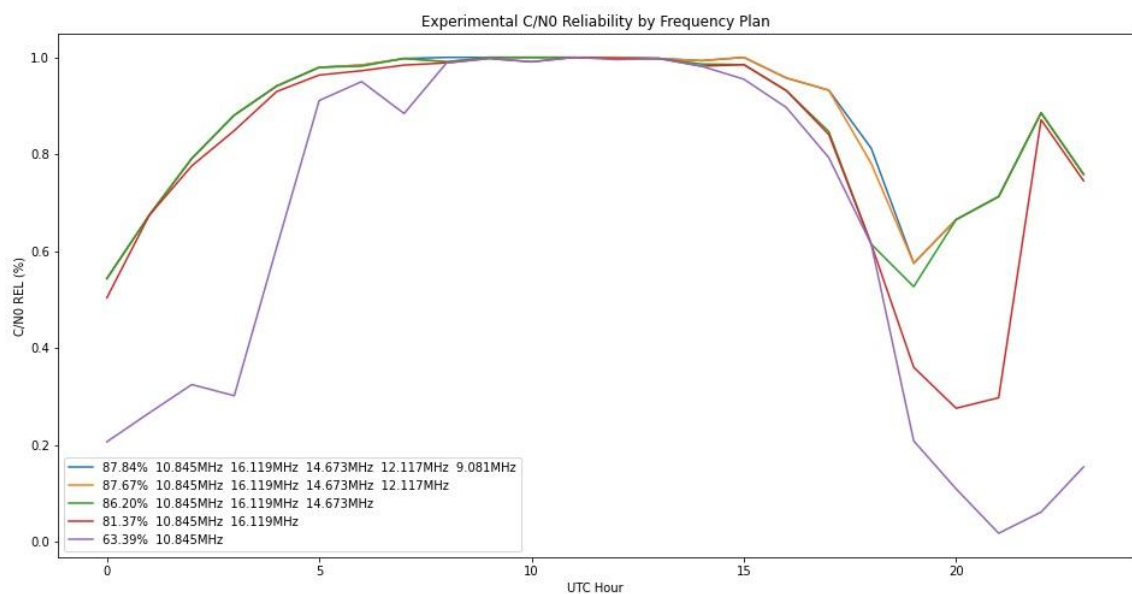


Figure 2-9 周波数の数と疎通率

3 VOACAP の有用性

3.1 有用性を評価する上での方法論

VOACAP は、米国の諸官庁(以下ものなど)によって、1940 年代より継続的に開発されてきています。

- 国立標準局 (National Bureau of Standards)
- 環境科学サービス庁(電気通信科学及び大気物理学研究所) (Environmental Science Services Administration - Institute for Telecommunication Sciences and Aeronomy)
- 海軍調査研究所 (Naval Research Laboratories)
- 国立電気通信・情報行政庁(電気通信科学研究所) (National Telecommunications and Information Administration - Institute for Telecommunication Sciences (NTIS))
- ボイスオブアメリカ(米国アマチュア無線協会と NTIS の助力と共に) (Voice of America with assistance of National Radio League (NRL) and NTIS.)

ベースとなっている諸係数の表は、理論モデルを改善するために、電離層の実測データ(国際地球観測年 (IGY⁴) の 1958 – 1963 年)を利用して、作成されています。この諸係数の表より、電波伝搬における臨界周波数や大気中の電波雑音を導き出すことができます。

短波帯の無線システムを計画する上で、VOACAP が有効なツールだと考えています。その理由は、

1. VOACAP は、その前身となるソフトウェアと合わせて、長年開発されて続けていること。
2. VOACAP は、実測データに裏付けられた、科学的なツールであること。

3.2 VOACAP の疎通率の有効性

VOACAP のよくある質問 (FAQ⁶) は、50%より低い疎通率の予測を利用しないこと、70%より低い疎通率の予測は信頼できないことを述べています。FAQ はさらに、次のように説明しています。

このような場合、疎通率は、与えられたデータの中で、平穏な月における各時間帯に起こるであろう、最良の推測であると仮定することができます。

VOACAP の疎通率がどの程度良好で正確であるかは、どれだけ慎重にシステムがモデル化されているか、どれだけ正確に電離層や地磁気条件がモデル化されているかに基づいています。利用されているアンテナパターンが実際のアンテナを反映しており、設定した必要 SNR が行う電波の送信に適したものならば、VOACAP が 70-90%の疎通率と予測した場合において、VOACAP は、疎通率が実現できると予測しています。VOACAP の開発時、ボイスオブアメリカ (VOA) は、短波帯監視専門家を動員してテストをしましたが、VOACAP の予測は非常に正確であるという結論になっています。

実際には、あるシステムデザインに対して、これは、正しい周波数で運用された場合、90%またはそれ以上の疎通率を、送信局で実現できることを意味します。この数値は、典型的な短波帯の電波システムで、ある一定の長期間において、現実的に実現できる最高の疎通率と考えられます。

VOACAP の疎通率の予測の正確性は、疎通率が 90%を下回ると急速に下がります。50%の疎通

⁴ International Geophysical Year (IGY) -

https://en.wikipedia.org/wiki/International_Geophysical_Year

⁶ VOACAP Frequency Asked Questions (FAQ) - <https://www.voacap.com/itshfbc-help/voacap-faq.html>

率では、全く通信ができなかったり、通信が非常に良好にできたり、その中間の状態であったりすることになります。

3.3 VOACAP 入力パラメータ

本節では、実験試験局のデータの分析をする上で利用した、VOACAP の入力パラメータについて記述します。これらの入力パラメータの詳細は、「“Setting VOACAP Input Parameters”⁷」に書かれています。

3.3.1 雑音

- 等方性アンテナでの分析:- 150 dBW/Hz
- 実験試験局アンテナでの分析:- 145 dBW/Hz

3.3.2 最小検出角

- 0.1 度

3.3.3 必要疎通率

- 90%

3.3.4 必要 SNR

- 22 dB-Hz

3.3.5 マルチパス偏差

- 0.100ms

3.3.5.1 太陽黒点数(SSN)

VOACAP を正確に利用するためには、太陽黒点数に関して、「International Smoothed Sunspot Numbers⁸」の利用が必須です。この数値は、SIDC (Solar Influences Data Analysis Center)の SILSO (Sunspot Index and Long-term Solar Observations)によって、13 ヶ月での調整済みの月別合計太陽黒点数⁹として発表されています。なお、この太陽黒点数のうち、最新の暦月が含まれる発表のものは、その調整方法の観点から、暫定版となっています。この暫定版の対象としている暦月と今後 12 ヶ月までの計算をする場合、改良 McNish Lincoln 法を利用した予測法¹⁰による太陽黒点数を利用することとしました。

⁷ Setting VOACAP Input Parameters - <https://www.voacap.com/setup.html>

⁸ <https://www.voacap.com/choosingssn.html>

⁹ https://www.sidc.be/silso/DATA/SN_ms_tot_V2.0.txt

¹⁰ <https://www.sidc.be/silso/FORECASTS/KFprediML.txt>

3.4 実験試験局に関する方法論

検知した通信に対して、受信した C/N_0 値を測定し、必要 SNR を越えるものの割合を算出しました。この割合は、VOACAP の疎通率予測との比較に利用されています。

そして、この数値を各周波数で算出し、暦年、暦月、時へと重ね合わせ、VOACAP の予測と比較することになりました。

3.5 VOACAP の予測と実験試験局の結果の比較

VOACAP が高い疎通率を予測する暦月において、実験試験局の結果は、VOACAP の予測との高い相関を示しています。

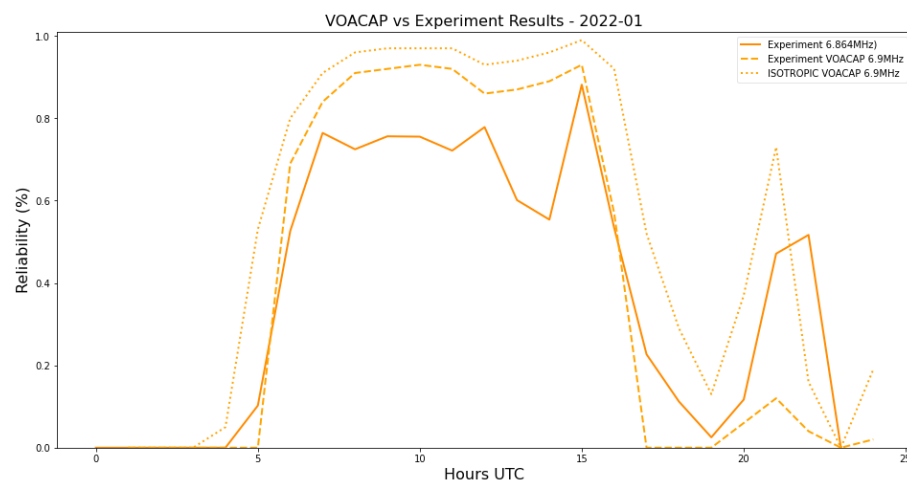


Figure 3-1 VOACAP と実験試験局の結果(2022 年 1 月)

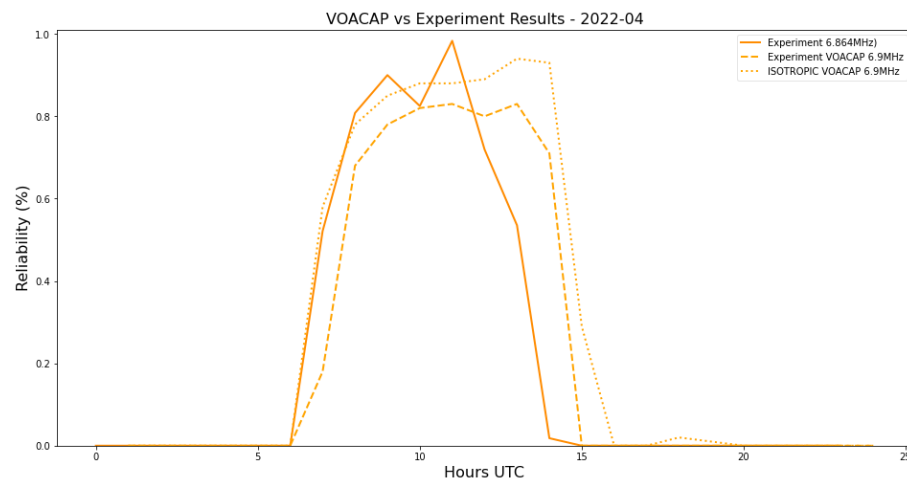


Figure 3-2 VOACAP と実験試験局の結果(2022 年 4 月)

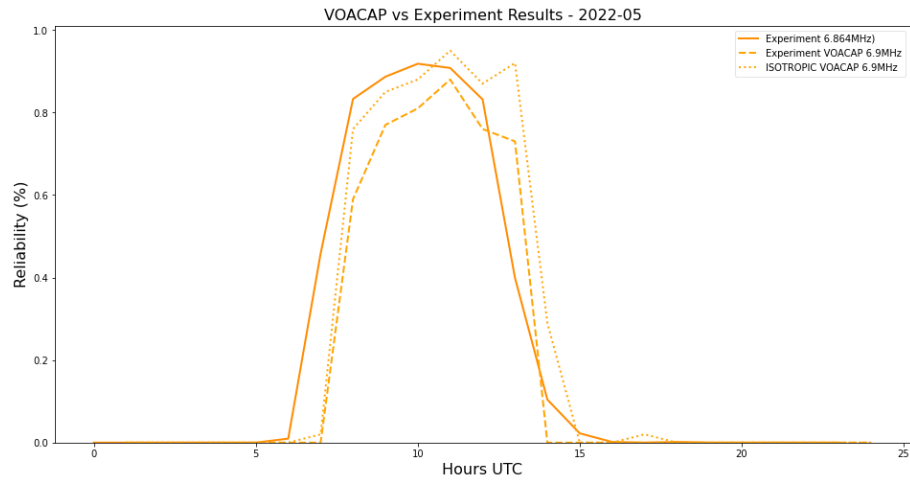


Figure 3-3 VOACAP と実験試験局の結果(2022 年 5 月)

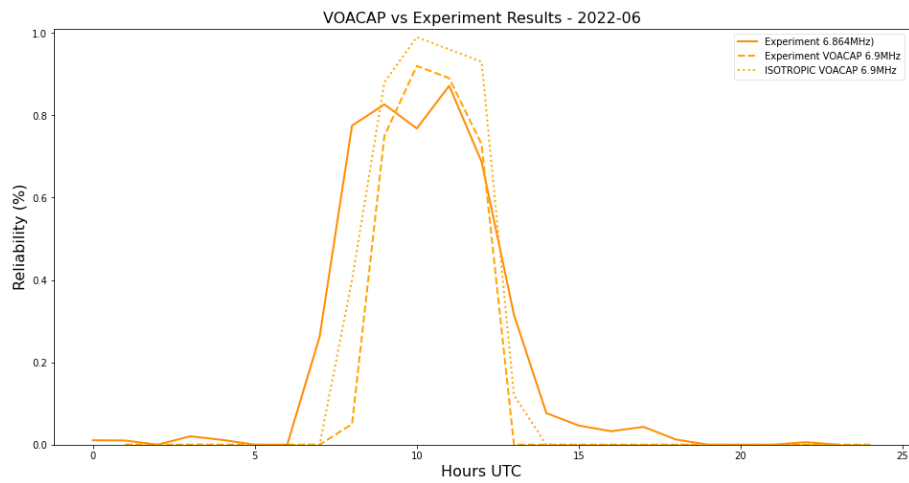


Figure 3-4 VOACAP と実験試験局の結果(2022 年 6 月)

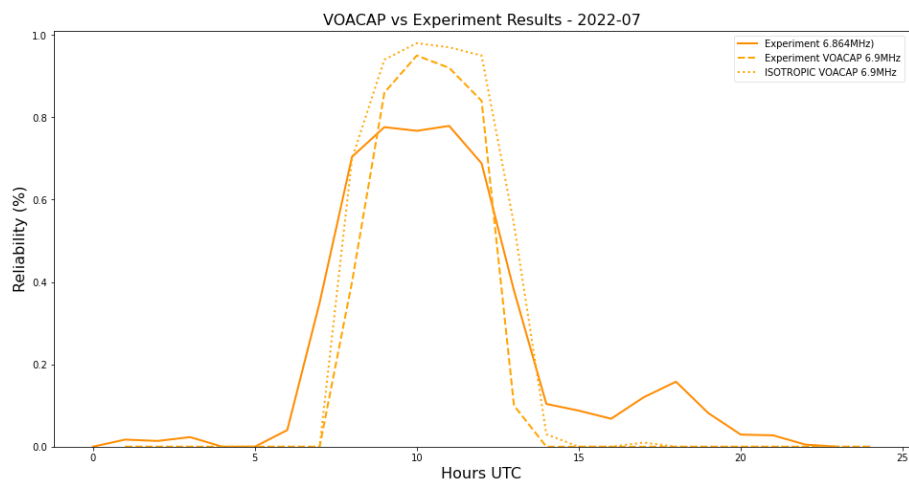


Figure 3-5 VOACAP と実験試験局の結果(2022 年 7 月)

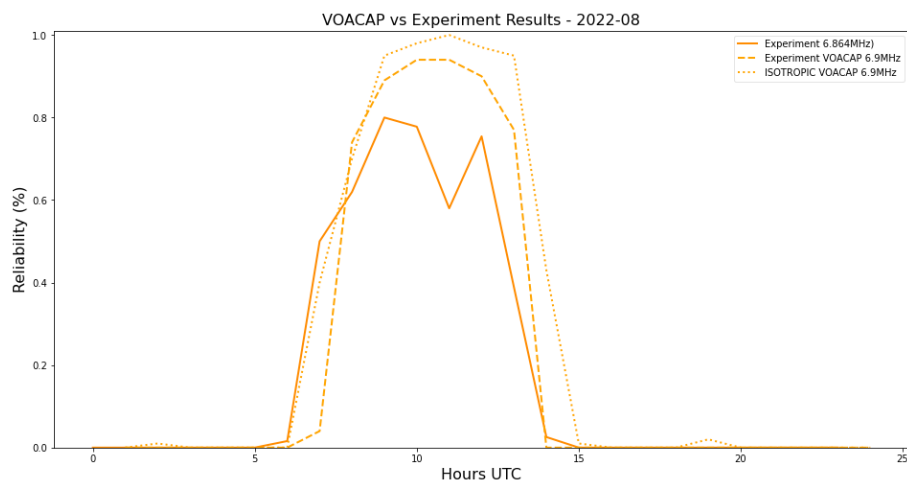


Figure 3-6 VOACAP と実験試験局の結果(2022 年 8 月)

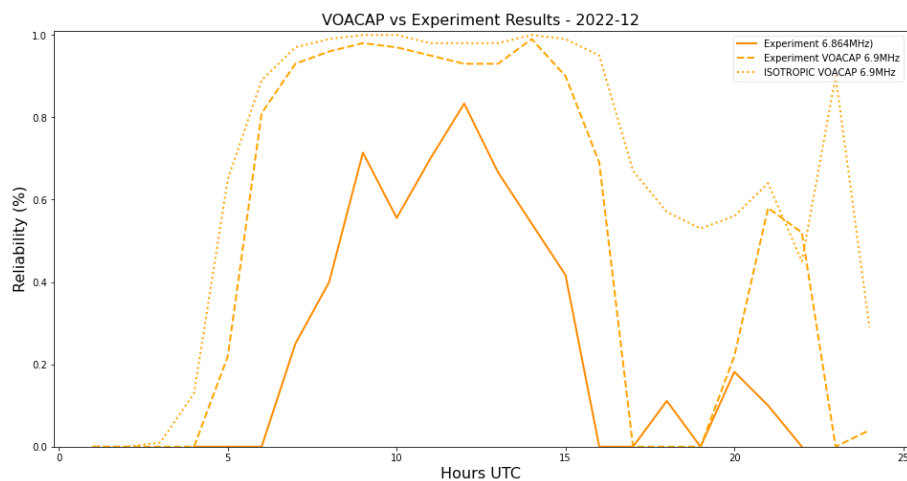


Figure 3-7 VOACAP と実験試験局の結果(2022 年 12 月)

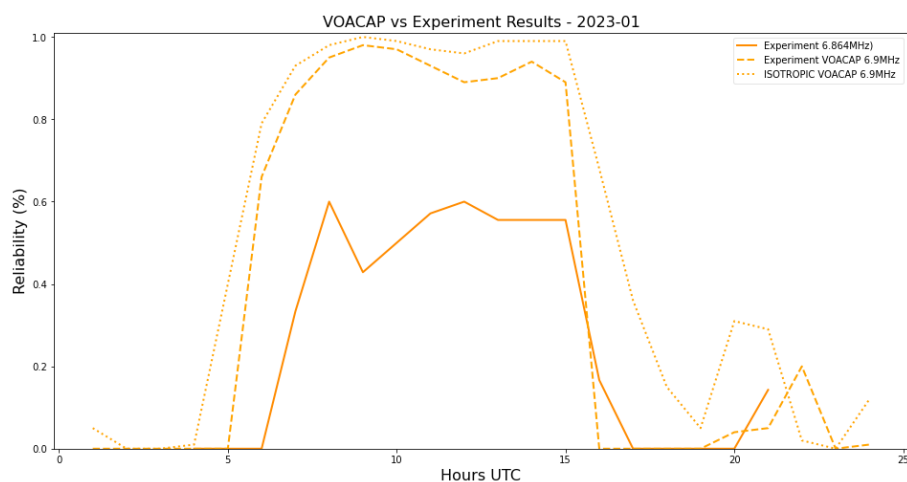


Figure 3-8 VOACAP と実験試験局の結果(2023 年 1 月)

下図のように、VOACAP と実験試験局の結果(2022 年 5 月) (Figure 4-3 のこと)に類似した図 (6864 kHz に対して)を、VOACAP (Windows 版)を実行して出力しました。下図と Figure 4-3 を比較すると、非常に似た図となっていることが分かります。また、この比較は、実験試験局の他の周波数でも、同じような結果となります。

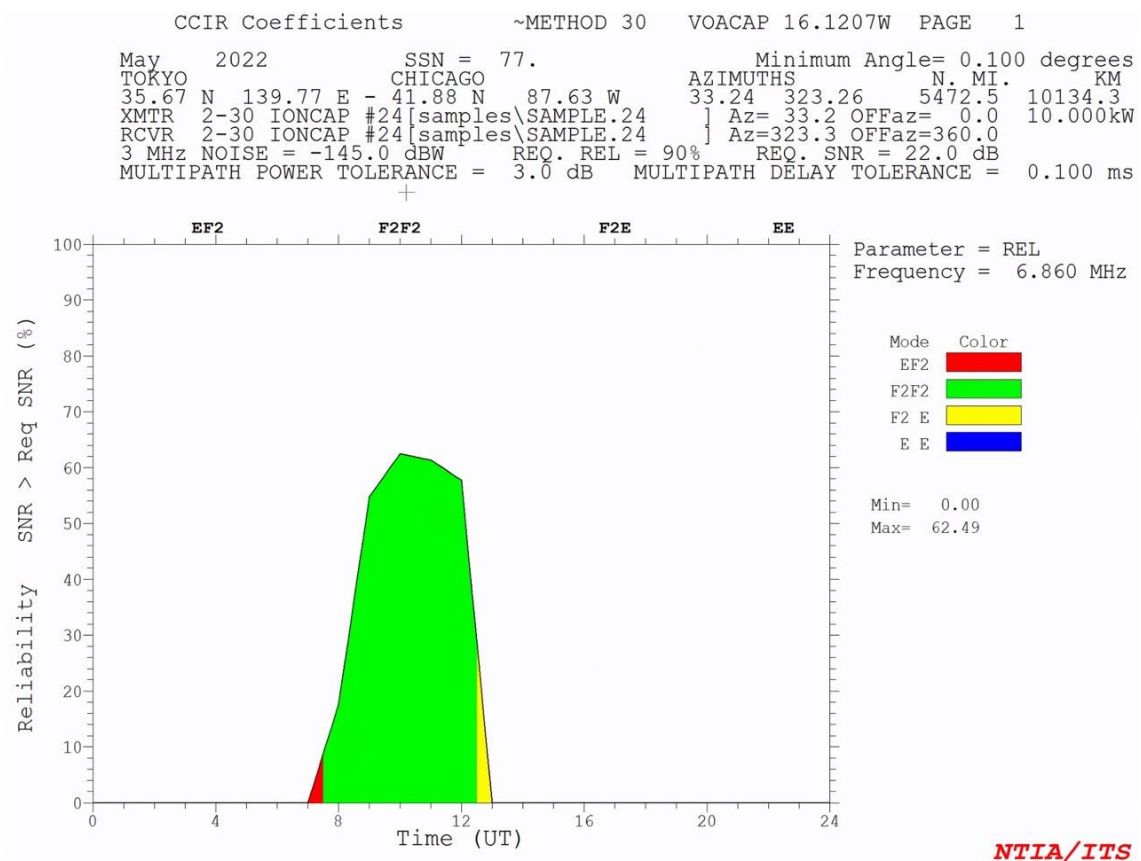


Figure 3-9 VOACAP(Windows 版)の結果(2022 年 5 月)

3.6 実験試験局の結果と VOACAP の予測の比較を改善するための考察

地磁気の諸係数データを導入しておらず、これが、実験試験局の疎通率の数値と VOACAP が予測する疎通率の数値の乖離を説明するかもしれないと考えています。VOACAP が予測する疎通率の数値は、一般的な地磁気の状態、つまり、地磁気の擾乱がないという前提で、算出されています。

地磁気擾乱が、VOACAP モデルや諸係数の表が許容するレベルを超えた場合は、実験試験局の結果と VOACAP の結果が異なるものになることの理解が重要となります。

3.7 実験試験局からの VOACAP の有用性の分析

VOACAP は、2 地点間の短波帯の通信経路の通信性能を予測するために設計されています。VOACAP が通信経路の計画ツールとして利用される場合、正確な入力パラメータを利用することにより、暦月別の実際の通信経路の疎通率は、VOACAP の予測疎通率と高い相関で合致することとなります。

これによって、VOACAP を、ある特定の設計要件に従って、通信経路の性能を予想するために利用することができます。例えば、VOACAP を利用すれば、ある期間、ある空中線電力で、3 周波数帯で運用した場合の、無線局の通信性能を予測することができます。

実験試験局の結果に基づけば、VOACAP の予測は、高い相関で合致することがわかりました。

さらに、VOACAP は、ある時間、ある暦月において運用に適した周波数帯を、12 ヶ月前から事前
に選択することにも利用できると考えています。

日本から米国の通信経路の経験によって、VOACAP は、この通信経路において、3 から 4 個の周
波数帯で十分であることを示すためにも、利用することができます。周波数帯は、太陽黒点数に基
づいて評価される必要があり、これに応じて、割り当てを変更する必要があります。VOACAP は、こ
のように、新しい周波数帯を導き出すことにも利用することができます。

3.8 VOACAP が有用でない点

VOACAP は、ある通信経路の疎通率を予測するものの、短波帯デジタル固定局の全てのパラメー
タを決定することに利用できるわけではありません。例えば、変調方式や電波型式や占有周波数
帯幅を決定することには利用できません。

3.9 結論

VOACAP は、短波帯の通信経路の計画に有用なツールであり、実際に、短波帯の各種利用者か
ら人気を得てきています。

VOACAP によって、予想される通信性能の予測をすることができ、実験試験局の通信経路で利用
すべき適切な周波数帯を選択することができました。

以下余白