解説

二次元アレイアンテナを用いるレスキューレーダ

Rescue Radar with Two Dimensional Array Antennas

秋山 いわき^{*1} 竹内 敏夫^{*2} 斎藤 英雄^{*2} ^{*1}湘南工科大学工学部 ^{*2}慶應義塾大学理工学部

Iwaki Akiyama^{*1}, Toshio Takeuchi^{*2} and Hideo Saito^{*2}

^{*1}Shonan Institute of Technology ^{*2}Faculty of Science and Technology, Keio University

1. はじめに

地震発生後のレスキュー活動における重要な課題の一つは、倒壊した建築物に閉じ込められた生存者の有無と位置を迅速に検知することである。従来、レスキュー用のレーダとしては、生存者の呼吸による周期的な動きを捉える CW ドプラレーダ [1] [2] が消防等に配備されている。このレーダは生存者の有無を検知するもの [3] であるが、生存者の位置を特定することは難しい。一方、Wu and Huang はパルスレーダを用いて、障害物の後方の生存者を反射波の位相変化を検出することで探知できると報告している [4]。また、Ahmad ら [5] は wall-through imaging のためのビームフォーミングについて報告している。Maaref ら [6] は FM-CW レーダを用いて建築物中の生存者の探査について試みている。

筆者ら [7] は、UWB (Ultra-wideband) パルスレーダを用いて、送受計五つのアンテナからなるレーダシステムを用いることにより、呼吸変動の統計的な性質を利用して、信号対雑音比 (Signal to Noise Ratio: SNR) の低い受信信号から生存者の呼吸変動を検出する手法を提案し、瓦礫モデル実験で被験者の呼吸を検知した。また、二次元的に並べた複数のアンテナで得られた信号から被験者の位置を特定するために、事前に取得されたデータとの相関を計算する手法を提案し、実験を行って被験者の位置を特定した [8]。しかし、瓦礫の状態によっては実際に測定される受信波と事前取得データが大きく異なる場合があり、その場合では正しく生存者の位置を測定できないという問題があった [9]。そこで、複数のアンテナを用いて受信される瓦礫内からの反射信号から、生存者の呼吸を検出して、その三次元位置を推定する手法を提案した。その有効性を確認するために、地上 3 [m]、縦横 3.5 [m] の室内実験塔を構築し、施設上部

から下方、被験者に向けて電波を送受し、被験者の呼吸ならびに位置を特定した [10]。本解説では、開発したレスキューレーダシステムの詳細と実験結果について述べる。

2. レーダによる呼吸変動の探知

レーダを用いて瓦礫内の生存者を探査する基本的な考え方は、受信電波に含まれる呼吸周期と同一な周期で変動する信号成分の有無を検知するというものである。生存者で反射した電波の振幅と位相は、呼吸と同期して時間的に変化する。したがって、受信波を直交検波して得られた複素振幅の呼吸周波数で変動する成分を取り出すことで生存者からの信号を取り出すことができる。また、呼吸による周波数は 0.2 [Hz]~0.5 [Hz] の範囲で変動する [6] ので、その周波数の範囲の変動成分を取り出すことで、異なる周期の振動と区別して生存者の有無を検知することができる。

3. 二次元アレイアンテナを搭載した UWB レーダ

3.1 信号処理による雑音の低減

周期的に変動している物体からの反射波は、その動きによって振幅と位相が変調される。変調された信号は、瓦礫上に配置された複数のアンテナで測定される。それぞれのアンテナで受信される反射波は、瓦礫中の伝播経路にかかわらず、反射源の動きによって変調される成分を有している。特に、その基本周波数はいずれのアンテナで受信された信号について同一であると考えられるから、すべてのアンテナで受信される信号から呼吸周波数近傍で復調された複素信号のスペクトルを積算すれば、反射源の周期的な変動成分の信号対雑音比 (SNR) を効率よく向上できる。二つのスペクトルの積は、相互相関のフーリエ変換であるから、複数のスペクトルの積は複数の信号の相関と等価と考えられる。

3.2 アレイアンテナの構成

操作性ならびに可搬性を考慮すれば、アンテナは少ないほうが有利であるが、信号の SNR 向上や生存者位置の特定精度向上のためには、多数用いるほうが有利である。本研究では、送信アンテナを中心に一つ、そしてその周囲に受信アンテナを四つ配置したものを一つの筐体に格納し、そ

原稿受付 2009 年 11 月 30 日

キーワード: Cross Correlation, Respiratory Fluctuation, UWB, Pulse Radar, Phased Array

^{*1}〒251-8511 藤沢市辻堂西海岸 1-1-25

^{*2}〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1

^{*1}Fujisawa-shi, Kanagawa

^{*2}Kohoku-ku, Yokohamas-shi, Kanagawa

図1 モジュール内アンテナの配置. ○は受信アンテナ, ●は送信アンテナ

図2 レーダシステムの全体と写真. それぞれのモジュールには位置測定のための AR マーカーが取り付けられているため, 9 個のモジュールは瓦礫の状態に合わせて配置できる

れを 9 個作成した. つまり, 45 個のアンテナで全体を構成した. このように 5 個のアンテナをモジュール化することにより, アンテナの数を少なくすることなく全体の操作性と可搬性を向上させることができた [6]. モジュール化されたアンテナは図 1 のように縦横 30 [cm] の筐体の中に電波吸収体とともに格納されている. アンテナは, すべてスパイラルアンテナであり, その周波数帯域は, 450 [MHz]~8.0 [GHz] までを有している. 電波吸収体はアンテナの上部に設置され, 電波を上方へ送信することを妨げ, 下方のみへ送信するようにした.

本レーダシステムでは, 瓦礫の上部に九つのモジュールを設置し, 電波を送受信することにより, 瓦礫下に閉じ込められた生存者の有無と位置を測定する. 図 2 にレーダシ

ステムの写真と概略図を示す. また, それぞれのモジュールには, その位置をカメラ撮影で測定するための AR マーカーが取り付けられている. したがって, 9 個のモジュールは瓦礫の状態にあわせて自由に配置したあと, カメラ撮影によりそれぞれの位置が測定される.

3.3 レーダ送受信機および測定方法

レーダ送受信機は 9 個の送信アンテナを切り替えるマニュアルスイッチと 36 個の受信アンテナを高速に切り替える高周波スイッチ, 電波を送信するための高周波パルス発生回路, 受信信号を増幅する高周波増幅器, パルス発生のタイミングを制御するための電圧制御型発振器 (Voltage Controlled Oscillator : VCO), 受信信号を低速の AD 変換器でサンプリングするための, 遅延線と相関器からなる [11]. このレーダ送受信機はノート型コンピュータ (Panasonic CF-Y8) と内蔵されている AD および DA 変換器 (National Instruments DAQcard NI-6052E) でレーダの制御および受信信号の取得が行われる.

九つの送信アンテナの中から選択された一つのアンテナから広帯域のパルス波を瓦礫下へ繰り返し送信して, その反射波を各モジュール内の四つのアンテナで受信する. 受信アンテナは 36 個あるので, 36 個の受信信号を約 1 秒で順次 AD 変換してコンピュータのメモリへ蓄積する. すなわち, 1 分から 10 分間のデータをサンプリング周波数約 1 [Hz] で測定することができる.

4. 生存者の位置の特定

4.1 アルゴリズム

瓦礫上に配置したアレイアンテナから電波を送受信することによって, 生存者の位置を特定するために, 筆者らは, それぞれの復調信号の位相遅延を用いるフェーズドアレイ法に前章で述べた雑音低減のための相関法を適用した手法を用いた.

一つのモジュールで得られたデータに対し図 3 に示されるような処理を行って, 距離対スペクトル画像を計算する. 電波は 10 [MHz]~20 [MHz] の周波数で繰り返し送信されるので, それぞれのアンテナで得られた信号は復調後, 時系列の時間変動信号となる. この時系列信号は, MTI フィルタによって静止成分が除去されたあと, 遅れ時間ごとにスペクトルが求められる. 遅れ時間は, アンテナからの距離に比例するので, アンテナからの距離ごとにスペクトルを求めることになる. この距離対スペクトル画像は, 一つのモジュールの中の四つのアンテナごとに乗算される.

生存者の三次元な位置を特定するために, 九つのモジュールで得られた九つの距離対スペクトル画像を用いる. 図 4 に示されるように, 送信アンテナと受信アンテナの位置から探査位置までの距離は受信アンテナの位置によって異なる. 距離対スペクトル画像を距離方向に計算された距離と

図 3 各モジュールの四つのアンテナで受信された信号から距離対スペクトル画像を作成

図 4 送受信アンテナと探査位置との距離は、アンテナの位置によって異なる

一致するようにシフトさせる。もし探査位置に生存者が存在すれば、スペクトルにおけるピークは一致するので、ピーク値は乗算されて増大する。もし、生存者がいなければ雑音レベルの値が乗算されるので減少する。

計算を簡略化するため、受信アンテナの位置については、モジュールの中心位置で代表させた。 k 番目の探査位置と送信アンテナまでの距離を d_k 、モジュール i ($i = 1, 2, \dots, 9$) までの距離を $d_{k,i}$ とすると、送信パルスが発射されてからモジュール i で受信されるまでの時間 $t_{k,i}$ は、光速を c として、式 (1) のように表される。

$$d_k + d_{k,i} = ct_{k,i} \quad (1)$$

式 (1) で表される距離と一致するように距離対スペクトル画像を距離方向にシフトさせる。

探査位置を瓦礫下の三次元的な空間の格子点に設定して上述の計算を行えば、生存者の存在する確率が高いほど、大きな値となる。そこで、このようにして得られた画像を生存度分布と呼ぶことにする。

4.2 瓦礫モデル実験

試作したレーダシステムと計算される生存度分布の有効性を確認するために、図 5 に示されるような室内実験塔を構築した。地上 3[m]、縦横 3.5[m] × 3.5[m] の大きさで、

図 5 室内実験塔

図 6 距離対スペクトル画像

1[m] ごとに床を設置して、机や筆筒などの瓦礫を設置できるようにした。この実験塔の 1 階、もしくは 2 階に被験者が仰臥位で通常の呼吸を行った。最上部に置かれたアンテナから被験者に向けて電波を送受信した。

被験者が 1 階（アンテナ下 3[m]）で仰臥位の場合の実験結果を示す。図 6 は一つのモジュールで測定された距離対スペクトル画像である。距離 3[m]、0.25 [Hz] にピークが認められ、この周波数は呼吸周波数の範囲にあることから、3[m] 下の生存者の呼吸変動が検出できることが確認される。

次に、このようにして得られた 9 個のモジュールの距離対スペクトル画像を用いて、3[m] 下の平面上の 8[cm] 間隔で 2[m] × 2[m] の領域で計算した。実験結果を図 7 に示す。それぞれの画像における最大値の位置と被験者の位置が一致していることが分かる。

次に、被験者二人がそれぞれ 1 階と 2 階に仰臥位にいる場合についての実験結果を図 8 に示す。それぞれの深さにおいて、被験者の位置と画像の最大値の位置は一致している。

図7 被験者の位置と3[m]下平面での生存度分布画像

図8 被験者が二人の場合

5. ま と め

瓦礫上にアンテナを二次元的に配置して生存者を探査するパルスレーダを開発し、瓦礫モデル実験を行って、その有効性を検討した。複数のアンテナを用いてSNRを向上させ、同時に生存者の位置を特定できることが示された。今

後の課題としては、可搬性の向上のため、モジュールを薄く、少なくすること、送受信器本体を軽量化することと考えるが、実現の見通しは明るい。その次のステップとして、コンクリート中心の瓦礫に対しては、アンテナを瓦礫内部へ挿入して、さらに生存者検出感度を高めることが重要である。例えば、ボーカメへの内蔵、レスキューロボットへの搭載については検討する価値があると思われる。

謝 辞 本研究は消防庁消防防災科学技術研究推進制度の援助を受けて行われた。本研究を実施するに当たりご支援いただいた特定非営利活動法人レスキューシステム研究機構の田所諭会長、松野文俊理事、村田美香局長に深謝します。実験や計算で貴重なご意見をいただいた筑波大学大学院大矢晃久博士、慶應義塾大学理工学部青木義満博士に深謝します。実験に協力いただいたタウ技研株式会社後藤眞二氏、高橋昭雄社長に深謝します。

参 考 文 献

- [1] K.M. Chen, Y. Huang, J. Zhang and A. Norman: "Microwave Life-Detection Systems for Searching Human Subjects Under Earthquake Rubble or Behind Barrier," IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.27, pp.105-114, 2000.
- [2] H.R. Chuang, Y.F. Chen and K.M. Chen: "Automatic Clutter-Canceler for Microwave Life-Detection System," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.40, pp.747-750, 1991.
- [3] A.S. Bugaev, V.V. Chapursky, S.I. Ivashov and V.V. Razevig: "Through Wall Sensing of Human Breathing and Heart Beating by Monochromatic Radar," Proceeding of GPR 2004, vol.1, pp.291-294, 2004.
- [4] C.-W. Wu and Z.-Y. Huang: "Using the Phase Change of a Reflected Microwave to Detect a Human Subject Behind a Barrier," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol.55, no.1, pp.267-272, 2008.
- [5] F. Ahmad, Y. Zhang and M.G. Amin: "Three-Dimensional Wideband Beamforming for Imaging Through a Single Wall," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol.5, no.2, pp.176-179, 2008.
- [6] N. Maaref, P. Millot, C. Pichot and O. Picon: "A Study of UWB FM-CW Radar for the Detection of Human Beings in Motion Inside a Building," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.47, no.5, pp.1297-1300, 2009.
- [7] I. Akiyama, N. Yoshizumi, A. Ohya, Y. Aoki and F. Matsuno: "Search for Survivors Buried in Rubble by Rescue Radar with Array Antennas—Extraction of Respiratory Fluctuation," Proceeding of the 2007 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, pp.1-6, 2007.
- [8] T. Takeuchi, Y. Uematsu, H. Saito, Y. Aoki, A. Ohya, F. Matsuno and I. Akiyama: "Measurement of Survivor Location for Rescue Radar System by using Two Dimensional Array Antenna," Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, pp.1-6, 2008.
- [9] T. Takeuchi, H. Saito, N. Yoshizumi, A. Ohya, Y. Aoki, F. Matsuno and I. Akiyama: "Rescue Radar System with Array Antennas," The 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.1782-1787, 2008.
- [10] 特定非営利活動法人国際レスキューシステム研究機構: 平成20年度消防防災科学技術研究推進制度委託研究成果報告書「震災時等に建築物等の倒壊現場のガレキ下(地下約5m)に埋まった生存者の有無およびその位置を迅速に特定するための手法の開発」, 2009.
- [11] 荒井郁男: 特開平5-240943, 相關型探知装置ならびに相關型信号検出装置, 1992年2月26日出願.

秋山いわき (Iwaki Akiyama)

1987 年慶應義塾大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。同年相模工業大学（現・湘南工科大学）工学部講師，助教授を経て 1994 年から同教授。レスキューレーダ，医用超音波イメージングに関する研究に従事。2005 年日本超音波医学会松尾賞受賞。電子情報通信学会シニア会員，計測自動制御学会，日本音響学会，IEEE 各

会員。

斎藤英雄 (Hideo Saito)

1987 年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。1992 年同大学大学院理工学研究科博士課程修了。1992 年同大学助手。同講師，同助教授を経て，2006 年同教授。博士（工学）。主としてコンピュータビジョンに関する研究に従事。電子情報通信学会，情報処理学会，映像情報

メディア学会，電気学会，日本 VR 学会，IEEE 会員。

竹内敏夫 (Toshio Takeuchi)

2007 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。2009 年同大学大学院解放環境科学専攻修了，現在キヤノン（株）勤務。在学中は画像処理，信号処理に関する研究に従事。