

天波超视距雷达多径信道均衡方法

王召迎, 张洁寒, 张 瑜

(河南师范大学 物理与电子工程学院, 河南 新乡 453007)

摘 要:具有大范围、远距离、隐身和超低空目标探测等特点的天波超视距雷达已成为目前雷达领域研究的重点技术之一. 针对天波超视距雷达工作中多径效应对雷达回波信号的污染问题, 提出了一种抑制多径污染的信道均衡方法. 首先利用已知的训练序列对多径信道进行估计, 然后利用具有一定结构的滤波器实现信道的均衡, 最终达到了抑制多径信道对雷达回波信号影响的目的. 仿真实验证明, 该方法可以有效地对多径效应引起雷达回波信号的污染进行抑制, 进而提高雷达对目标的检测能力.

关键词:天波超视距雷达; 电离层; 多径效应; 信道均衡

中图分类号: TN011

文献标志码: A

一般雷达在探测目标时都是首先由发射机发射电磁波照射目标, 电磁波经目标反射后回到接收机, 接收机根据回波的信息获得目标有关信息. 由于地球曲率(凸起)作用, 雷达直射波只能探测到电磁波射线与地球面相切线(地平线)之上的空中目标, 而地平线以下的目标就成为雷达的探测盲区^[1-2]. 为了增大雷达的作用范围和扩展其应用功能, 除了增大雷达发射功率外, 不同体制的超视距雷达(Over-the-Horizon Radar, OTHR)已成为目前雷达领域研究和应用的热点. 其中, 天波超视距雷达以其大范围、远距离、多目标、隐身和超低空目标等探测能力特点成为雷达领域研究的重点^[3-4].

然而, 由于天波 OTHR 是在高频段利用电离层媒质后向散射传播对远距离目标进行下视探测, 其性能必定会受到高频频段内的外部有源干扰、非平稳的电离层媒质和下视探测方式等引入的无源干扰等因素的影响. 其中, 电离层对于天波 OTHR 回波信号产生的多径效应是产生重大频谱污染的主要因素之一^[5-6].

天波 OTHR 主要利用电离层的 E 和 F 层对电磁波进行反射, 其电磁波传播路径由多个不同的电磁波射线路径组合而成. 当电磁波射线由不同的电离层反射路径组合时, 会出现多个目标具有相同的斜距, 产生多模传播. 尽管在天波 OTHR 白天主要由 F 层反射工作, 晚上主要由 E 层反射工作, 但是同一电离层电子浓度的不均匀性使得一个目标经同一电离层反射后也会出现多个不同路径射线, 产生多径传播. 多模传播使得雷达接收信号的多普勒谱产生模糊, 影响了目标检测, 如可能使得将空间多个目标误认为成一个目标. 多径传播使得雷达回波信号出现重叠, 可能会存在 2 个以上的 Bragg 峰, 影响目标的定位跟踪性能, 如可能将一个目标误认为成多个目标.

为了抑制多模传播, 实现单模传播, 最好的方法是选择合适的工作频率, 使得电磁波只在一个电离层内传播, 常用的方法是采用实时频率管理系统进行实时选频, 这一方面已有较好的研究成果^[7-9]. 在抑制多径传播方面, 目前主要在通信领域和视距低角雷达领域研究的较多, 而在复杂的天波 OTHR 领域研究的较少^[10-12]. 由于多径效应对天波 OTHR 探测性能的影响较大, 因此本文主要对天波 OTHR 中的多径效应抑制方法进行研究, 给出利用信道均衡方法来达到抑制多径影响的目的, 为该方法的实际工程应用奠定基础.

收稿日期: 2014-11-16; 修回日期: 2015-01-18.

基金项目: 国家自然科学基金(61077037)

作者简介: 张 瑜(1963-), 男, 河南沁阳人, 河南师范大学教授, 主要研究雷达技术及应用.

通信作者: 王召迎, E-mail: 911283504@qq.com.

1 天波超视距雷达信道估计与均衡思想

假设不考虑其他噪声的影响,OTHR 的发射信号为 $e(t)$,通过电离层反射后的接收信号为 $r(t)$,它应包括主通道的回波信号 $e(t)$ 和由于多径引起的各路径的回波信号 $a_m e(t - T_m)$,其中 m 为多路径的个数, T_m 为第 m 条路径引起的时延,系数 $a_m (a_m < 1)$ 为第 m 个路径对信号强度产生的衰减.如果共有 $N + 1$ 条路径,假设主通道无时延和无衰减,即 $T_0 = 0, a_0 = 1$,则接收信号为 $r(t) = e(t) + a_m e(t - T_m) = \sum_{m=0}^N a_m e(t - T_m)$.

据此可以写出当信号通过电离层媒质信道时产生的冲击响应 $h(t) = \sum_{m=0}^N a_m \delta(t - T_m)$. 求取冲击响应 $h(t)$ 的过程称为信道估计. 借助卷积关系,可将输入信号 $e(t)$ 激励下产生的输出响应 $r(t) = h(t)e(t)$.

为了从含有多径信号的回波信号中得到主通道信号,就需要增加一个逆通道,使得该逆通道能够抵消电离层多径信道的影响,进而获得主通道的信号 $e(t)$. 该逆通道实际上是一个电离层多径信道的逆过程,称为信道均衡,或称为均衡滤波器,如图 1 所示.

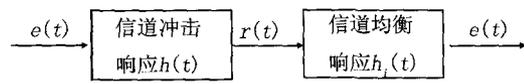


图 1 信号估计与均衡

增加信道均衡滤波器后,输出的响应为 $e(t) = r(t)h_i(t) = e(t)[h(t)h_i(t)]$. 显然,只要增加的信道均衡滤波器能够满足 $h(t)h_i(t) = \delta(t)$,就能够确保最终得到主通道信号 $e(t)$.

2 信道估计方法

信道估计是就从已知的接收信号中对信道模型参数进行估计的过程. 针对 OTHR 系统中的多径效应对回波信号的影响,为了减少计算的复杂度,实现快速收敛,这里采用具有工程实用价值的基于训练序列的信道估计方法^[13],在信道估计准则中,采用性能相对较好的最小均方误差准则^[14].

假设 h 为多径信道的冲击响应,设其长度为 $(L + 1)$,表示为 $h = [h_0, h_1, \dots, h_{L-1}, h_L]^T$,上标 T 表示矩阵的转置; S 为输入信道的原始信号,它由相互正交的样本序列组成,其序列长度 $M + 1$; V 表示均值为零、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声; X 为接收信号,它也是一个样本序列,序列长度等于信道长度, $N = L$,包含通过电离层信道后的入射信号和噪声信号,如图 2 所示.

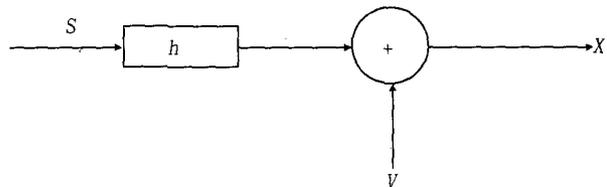


图 2 信道估计中的信号模型

接收信号 X 如用向量表示,则有 $X_n = h^T S_n + V_n$. 根据信号在信道中传播的传输特性,利用各信号之间的正交性,则有 $E[x_n s_{n-L}^*] = [h_L, \dots, h_0]^T = \frac{1}{M-L+1} (\sum_{n=L}^M x_n s_{n-L}^*)$. 从上式可以得到信道的冲击响应 h ,即信道估计的结果.

3 信道均衡方法

信道均衡的实质是一种逆滤波器. 通过该逆滤波器与信号的信道效能抵消,可恢复出较纯净的输入信号. 特别要注意的是,它是对信号传输信道的均衡,具有与传输信道特性相反的特性.

为实现 OTHR 系统中多径信道的均衡,首先需要建立其信道模型,如图 3 所示. 图 3 中的虚线框中部分即为信道估计的信号模型,其有关参数与信道估计中相同. f 为滤波器,也称为均衡滤波器,它主要是对原始信道(电离层信道)冲击响应 h 进行逆模拟,以抵消原始信道对信号的影响,以恢复输入信号 S . \hat{S} 为经信道均衡后的输出信号估计.

设均衡滤波器为 $f = [f_0, f_1, \dots, f_{N-1}, f_N]^T$,则应有 $f^H X_n = s_{n-d}$. 其中, d 为滤波器时延,上标“ H ”表示

共轭转置. 如果取均衡滤波器的长度为 $(N + 1)$, 接收信号序列长度同样取 $(N + 1)$ 时, 一个 $1 \times (N + 1)$ 的向量与一个 $(N + 1) \times 1$ 的向量相乘得到一个单个的元素. 为了使得均衡滤波器能够对信道估计 h 全覆盖, 均衡滤波器长度应不小于信道长度, 即 $N \geq L$.

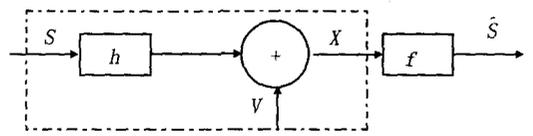


图 3 信道均衡中的信号模型

根据最小均方误差准则, 可估计出均衡滤波器的参数, 即根据 $\min E[\|s_{n-d} - f^H X_n\|^2]$ 对均衡滤波器进行估计.

在统计意义上 $\min E[\|s_{n-d} - f^H X_n\|^2]$ 可由下式估计 $\min E[\|s_{n-d} - f^H X_n\|^2] \Leftrightarrow \min (s_{n-d}^2 - f^H \hat{h}_d - \hat{h}_d f + f^H R_x f)$. 对上式关于 f 进行求导可得 $f = R_x^{-1} \hat{h}_d$. 其中, $R_x = E[X_n X_n^H] = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k X_n X_n^H$ 为接收信号 X_n 的自相关矩阵, $\hat{h}_d = E[X_n s_{n-d}^*] = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M X_n s_{n-d}^*$ 为估计信道的参数, X_n^H 为接收信号 X_n 的共轭转置矩阵.

经过信道均衡后, 输出的信号估计为 $\hat{S} = S(hf)$.

在实际电离层多径信道抑制中, 可根据多径信道估计和均衡方法按如下方法进行处理.

- 1) 将输入信道的原始信号分为两部分, 一部分为已知的参考信号, 即训练序列, 另一部分为未知信号, 即所求信号. 接收信号也分为两部分, 一部分为与参考信号相对应的接收信号, 设为接收信号 1, 另一部分为与原始信号中的未知信号相对应的接收信号, 设为接收信号 2.
- 2) 利用参考信号与接收信号 1 进行信道估计, 得到多径信道的冲击响应 h 和输出序列 X_n .
- 3) 利用输出序列 X_n 求出其自相关矩阵 R_x , 再利用 (8) 式求出对均衡滤波器参数 f .
- 4) 利用接收信号 2 与均衡滤波器求出原始信号中未知信号的估计值. 此时接收信号 2 即为抑制了多径影响的输出信号, 可作为雷达的回波信号进行处理.

4 仿真与分析

为了检验天波超视距雷达多径效应经信道估计和均衡后的抑制效果, 利用 MATLAB 软件和本文提出的信道估计和均衡方法对雷达的回波估计的效果进行仿真.

4.1 信道估计仿真与分析

假设输入信号序列长度为 1000, 信噪比为 25 dB, 经过多径信道估计后的结果与真实信道结果的比较如图 4 所示.

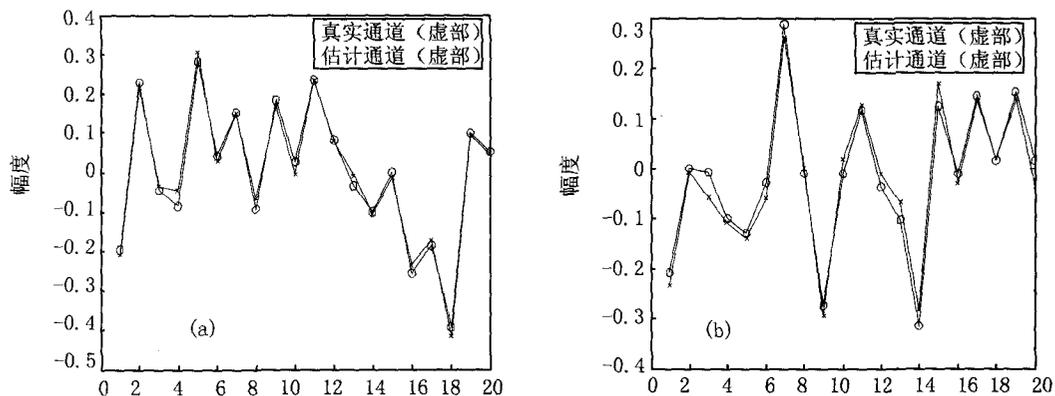


图 4 多径信道估计与真实信道对比

从对比结果可见, 本文方法对信道估计 (包括实部和虚部) 较为准确, 只有某些点有小幅偏差, 说明信道估计方法具有较好的有效性和实用性, 且精度较高.

4.2 信道均衡仿真与分析

假设天波超视距雷达发射信号的信噪比为 25 dB,输入 256 个采样点,真实目标在第 60 个距离单元.多径信道长度为 8,其中有响应的信道为 3 条,分别第 2、5、6 个信道,均衡滤波器长度为 9.

利用 MATLAB 软件和本文提出的信道估计和均衡方法进行仿真.图 5(a)为雷达发射的原始信号,图 5(b)为雷达接收的真实信号,图 5(c)为采用多径信道均衡后的信号.

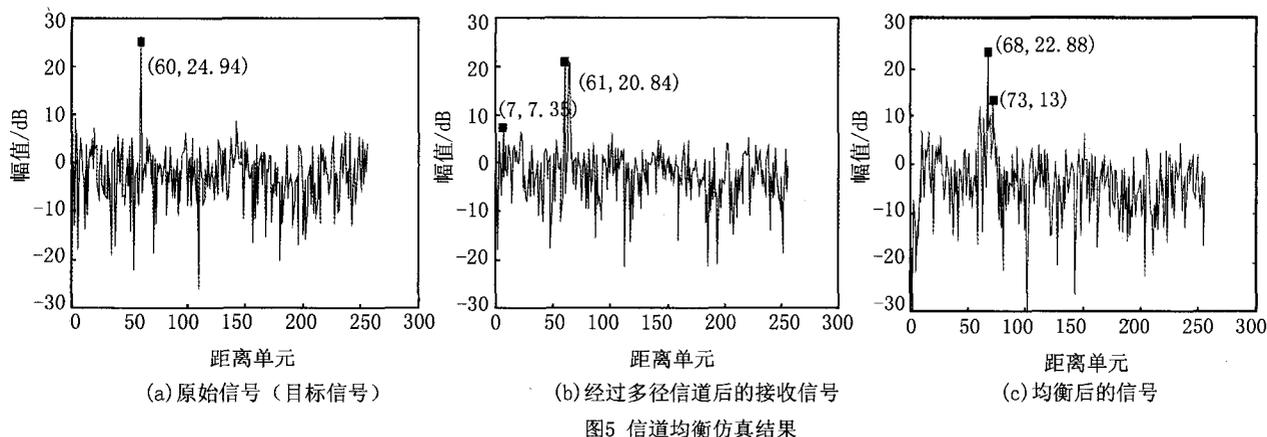


图5 信道均衡仿真结果

从图 5 可见,天波超视距雷达发射的原始信号经过 3 条有响应多径信道后,在距离维上分散成 3 个信号,如图 5(b)所示.通过信道均衡后在距离维上均衡为一个信号,如图 5(c)所示,但是原本应在第 60 个距离单元的信号此时移到了第 68 个距离单元,这是由于信道和滤波器的时延所造成的,可以通过信道长度 L 和滤波器长度 N 计算得到.从多径信道的均衡效果看,均衡后的雷达回波信号可以使得接收雷达进行有效处理,不至于将目标视为 3 个.但是信道均衡后由于输出信号的旁瓣较高,这会影响雷达回波的信号检测,为此需要采取其他方法对均衡后的信号进行旁瓣抑制.

为对均衡后的信号进行旁瓣抑制,这里采用增加均衡器长度的方法.假设在其他条件不变的情况下,均衡器的长度分别变为 19 和 49,经信道均衡后的输出信号如图 6 和图 7 所示.

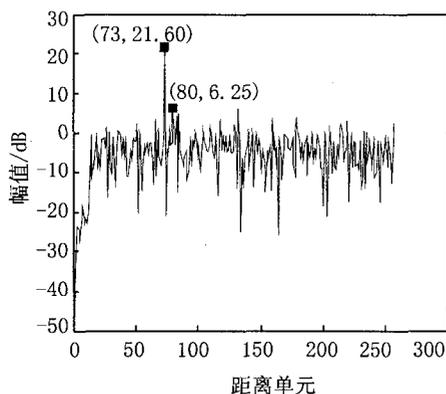


图 6 均衡长度为 19 时的输出信号

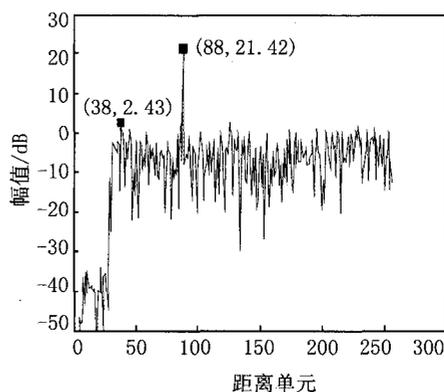


图 7 均衡长度为 49 时的输出信号

由图 5~图 7 可见,当均衡滤波器长度分别为 9、19 和 49 时,主信号电平分别为 22 dB, 21.6 dB 和 21.42 dB,其旁瓣电平分别为 13 dB、6.25 dB 和 2.43 dB.说明均衡滤波器的长度变化对主信号电平的影响较小,而均衡滤波器长度较小时,输出信号的旁瓣电平较高,随着均衡滤波器长度的增加,输出信号的旁瓣电平逐渐降低.结合主信号和旁瓣电平的变化,说明增加均衡滤波器的长度不仅可以压低输出信号的旁瓣电平,而且可以提高输出信号的信噪比.在实际应用中,可以根据雷达系统所要求的信噪比、旁瓣电平等来确定信道均衡滤波器的长度,以满足雷达系统对回波信号的精度要求.

5 结 语

高频天波超视距雷达以其独特的优点已成为目前雷达领域研究和应用的重点之一。高频天波超视距雷达的传播信道为时变的非平稳电离层媒质,且利用下视工作方式,因此必定会产生信号传播的多径效应,进而影响雷达回波信号的检测性能。通过多径信道估计和均衡不仅可以有效地抑制多径信号,提纯回波信号,而且可以实现压低旁瓣电平、提高输出信号信噪比的功能,最终为雷达对回波信号的有效检测奠定基础。

参 考 文 献

- [1] 丁鹭飞,耿富录. 雷达原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1997.
- [2] Skolnik M I. 雷达手册[M]. 2 nd. 北京:电子工业出版社,2007.
- [3] 周文瑜,焦培南. 超视距雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [4] 周万幸. 天波超视距雷达发展综述[J]. 电子学报,2011,39(6):1373-1378.
- [5] Anderson S J, Abramovich Y I. A unified approach to detection, classification, and correction of ionospheric distortion in HF sky wave radar systems[J]. Radio Science, 1998, 33(4):1055-1067.
- [6] Abramovich Y I, Anderson S J, Solomon I S D. Adaptive ionospheric distortion correction techniques for HF skywave radar[C]//Radar Conference 1996, Proceedings of the 1996 IEEE National IEEE, 1996:267-272.
- [7] Liu Huixia, Liang Yan, Pan Quan, et al. A multipath viterbi data association algorithm for over the horizon radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9):1640-1644.
- [8] Pulford G W. OTHR multipath tracking with uncertain coordinate registration[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems, 2004, 40(1):38-56.
- [9] 杨 威,付耀文,龙建乾,等. 基于有限集统计学理论的目标跟踪技术研究综述[J]. 电子学报,2012,40(7):1441-1448.
- [10] Cantrell B, Graff J. Development of a Digital Array Radar[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2002, 17(3):22-27.
- [11] 王 峰,傅有光,孟 兵,等. 基于傅里叶变换的雷达通道均衡算法性能分析及改进[J]. 电子学报,2006,34(9):1677-1680.
- [12] 张 月,鲍庆龙,杨 剑,等. 宽带数字阵列雷达通道均衡方法的设计与实现[J]. 信号处理,2010,26(3):453-457.
- [13] Bossert M, Donder A, Zyablov V. Improved channel estimation with decision feedback for OFDM systems[J]. Electronics Letters, 1998, 34(11):1064-1065.
- [14] Barhumi I, Leus G, Moonen M. Optimal training sequences for channel estimation in MIMO OFDM systems in mobile wireless channels [C]//Broadband Communications, 2002. Access, Transmission, Networking. 2002 International Zurich Seminar on, IEEE, 2002:44.

Multipath Channel Equalization Method for Sky-wave Over-the-horizon Radar

WANG Zhaoying, ZHANG Jiehan, ZHANG Yu

(College of Physics and Electric Engineering, Henan Normal University, Xixiang 453007, China)

Abstract: With large range, long distance, stealth and super low altitude target detection and other characteristics of the over-the-horizon radar(OTHR) has become one of the key technologies of radar research. In view of the pollution problem of radar echo signal of multipath effect in the sky-wave OTHR work, this paper puts forward a method of channel equalization for suppression of multipath pollution. Firstly, the multipath channel estimation is performed using a known training sequence, and then using the filter with certain structure realized the channel equalization, and ultimately achieved the purpose of suppressing multipath channel effects on radar echo signal. Simulation experiments show that, this method can effectively suppress the radar echo signal of the pollution caused by multipath effect, and improves the target detection ability of radar.

Keywords: sky-wave over-the-horizon radar; Ionosphere; multipath effect; channel equalization