

天波超视距雷达瞬态干扰抑制

邢孟道, 保 铮, 强 勇

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 天波超视距雷达(OTHR)电波通过电离层折射作下视探测,具有观察距离远,观察范围广的特点.但由于采用 HF 频段,且电波传播环境复杂,不仅海(地)杂波强,而且有很强的干扰,如电台干扰、工业干扰、冲击噪声、闪电冲击和流星余迹回波等.干扰分长时间干扰和瞬态干扰,瞬态干扰持续时间短、强度大.本文首先讨论 OTHR 接收到的瞬态干扰的特点;然后讨论了瞬态干扰的滤除方法,即采用特征分解方法滤除海杂波,或在频域直接滤除地杂波,检测出瞬态干扰的位置后,在原始信号中挖除存在瞬态干扰的回波点,并用预测内插的方法,消除瞬态干扰谱对目标掩盖作用,使目标特别是舰船目标能被检测出来;最后通过实测数据的检验.

关键词: 天波超视距雷达(OTHR); 瞬态干扰; 闪电冲击; 流星余迹回波

中图分类号: TN958.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2002)06-0823-04

Transient Interference Excision in OTHR

XING Meng-dao, BAO Zheng, QIANG Yong

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: High-frequency(HF) skywave over-the-horizon radar(OTHR) looks down its targets from the ionosphere, it has a large operating range and a large cover areas, but it also receives strong backscatterer echoes from the terrain and sea, and interference, such as radio frequency interference, industrial interference, impulsive noise, lightning impulsive, meteor trail echoes and so on. Interference can be divided into long time interference and transient interference. Transient interference lasts a short time, but its intensity is great. This paper first discusses the character of transient interference, then discusses its excision method, finally the method has been successfully applied to the real data from China experimental OTHR. The transient interference excision method is: first eigendecomposition is used to separate the sea clutter subspace and filter it or ground clutter is filtered in frequency domain directly, then the transient interference can be detected, after that the original echoes with existing transient interference are excised, finally the excised clutter and target echoes are predicted by Burg linear prediction algorithm.

Key words: over the horizon radar(OTHR); transient interference; lightning impulsive; meteor trail echoes

1 引言

由于天波超视距雷达(OTHR)是电波通过电离层折射作下视探测,其有很强的杂波背景,同时它又工作在 HF 波段,外部噪声的干扰,特别是闪电和流星余迹等瞬态干扰很强.在强杂波和干扰背景下检测目标,必须尽量减小雷达的分辨单元.雷达的分辨单元是三维的,即距离、方位和多普勒.距离分辨依赖于信号频带的带宽,而在 HF 波段加宽频带限制较严,通常只是在外噪声的频率间隙里工作,而出现宽间隔的概率是不高的,用断续宽频带可提高距离分辨率,但会影响其他性能,如距离旁瓣升高,只能用于一些特殊场合.方位分辨的提高依赖于加大天线孔径,现在的 OTHR 的天线孔径已以千米计,再增长的潜力已不大.因此,减小 OTHR 的分辨单元主要应着眼于多普勒分辨的提高.多普勒分辨决定于相干积累时间,同时要求在积累时间里回波具有强的相干性.这对发射和

接收的稳定性提出了高的要求(按现代技术水平,可以满足),而对 OTHR 来说,电波传播路径中的相位污染和瞬态干扰影响很大.瞬态干扰是指存在时间远小于相干积累时间的干扰,此类干扰有很宽的多普勒谱,它会影响到几乎所有或大部分多普勒单元,应在时域处理过程中予以清除,对相位污染我们将另外讨论,本文主要研究瞬态干扰去除.在第 2 节将讨论 OTHR 接收到的瞬态干扰的特点;在第 3 节讨论在不同杂波情况下,瞬态干扰的滤除方法;第 4 节介绍本文方法对实测数据的处理结果.

2 瞬态干扰的特点

瞬态干扰,指冲击噪声、闪电冲击干扰、流星回波等局部结构的回波,它只对回波信号造成局部污染,即它只在若干个重复周期内出现,其持续时间短,但此类干扰强度大,在多普

勒有很宽的谱,会在频域掩盖目标信号^[1]。下面分别介绍瞬态干扰的主要部分:流星余迹回波和闪电冲击。

流星余迹回波,是流星的余迹对 OTHR 反射的电磁波,流星一般分为两类:流星雨和突发性的流星。流星雨只在一年中的某些时刻才出现,景象壮观,突发性的流星每时每刻都有,所以 OTHR 接收到的流星余迹回波一般是由突发性的流星所产生的,每天数以亿计的流星进入到地球的大气层,当这些流星以 12 到 75km/s 的速度进入到上层大气层 80 到 120 公里的范围内时,它的动能转化成热量,蒸发了流星表面的原子,这些与流星有相同速度运动的原子被电离,它们留下一条正电荷离子和自由电子的余迹。电离余迹实际上形如一个细而长的气体圆柱,流星粒子在它的头部。进入的流星的质量越大,在电离的流星余迹中的电子密度就越大。这就形成了能够反射无线电信号的流星余迹。这些余迹存在时间很短,一般持续在零点几秒到几秒钟,也有长达几分钟的。流星余迹可以进一步分为过密类余迹和欠密类余迹,过密类余迹持续时间比欠密类余迹长,但是过密类余迹非常少。

流星余迹回波主要有以下特点:(1)超视距雷达接收的流星余迹回波主要由对欠密度流星反射的,它们一般在距离地面 80 到 120 公里范围内。(2)由于流星余迹回波持续时间少于十分之一秒到几秒,所以它的傅立叶谱有零点几到 10Hz 宽度,流星余迹的移动还使其多普勒谱有一定的平移。(3)流星余迹干扰有时很强,不但可以从天线波束的主瓣进入,也可能从旁瓣进入;不但有直接回波,还可能有多径回波。在雷达波束中,每小时约有 $10^4 - 10^5$ 个突发的欠密度流星余迹,由于速率大,在 100 - 2800km 距离窗内表现为较高的附加背景干扰,流星余迹干扰约比大气无线电噪声电平高 10 - 20dB。在频率为 10 MHz 附近,流星余迹回波的强度最大,10MHz 以上,强度大大减小。(4)流星余迹形如一个细而长的气体圆柱,直径很小,一般在 0.5 - 4.5m 之间,长度约为 15 - 25km (30 - 40km 长的只在 5% 的时间内出现),所以概率很小。由于 OTHR 接收机的分辨单元为十余公里见方,所以流星余迹回波一般存在于一个或一到两个距离单元和一到两个波束内,如果从旁瓣进来,可能占多个波束。(5)欠密类流星余迹回波的持续时间一般大概是几百毫秒,OTHR 的相干处理间隔(CPI)一般为 10 秒的量级,所以一般来说这类流星余迹回波只在相对于相干处理间隔时间很短的时间段中存在,属于瞬态干扰。(6)有时多个余迹迭迭出现,此时余迹干扰可能持续时间达 1 分钟,持续长的流星余迹回波可能是过密度余迹回波,也可能是多个余迹回波的混合。(7)流星雨出现的机会虽然不多,一旦出现,可能造成很强的干扰。

闪电是指当随着云中电荷大量积聚,云和地(或云与云之间)的电位差逐渐增大,当电位差超过空气中击穿电压就会产生电离和放电。闪电按其发生的位置可分为云闪和地闪两大类,云闪是指那些与地面不接触的闪电放电,地闪是指那些与地面物体接触的闪电放电。对天波超视距雷达有影响的主要是地闪。由于一次闪电延续时间为 200 ~ 400ms^[2],对 10 秒级的 CPI 来说,属于瞬态干扰,也是加性干扰,从发生频度上讲,典型的闪电冲击约为每秒 1 个到每五秒 1 个。闪电冲击和流

星余迹回波不同,它不是回波,和发射信号不相关,脉冲压缩对它不起作用,且比一般的脉冲周期 10ms - 20ms 大得多,脉冲压缩后,闪电冲击存在于所有距离单元,和多个周期中,但它从空间某个方向来,所以主要存在一个方位单元中。针对小型飞机目标检测来说,在多雷电季节里,闪电冲击干扰使 OTHR 可利用时间下降 25%^[2]。

3 瞬态干扰的滤除

上面已经提到瞬态干扰主要有冲击噪声(impulsive noise),流星回波(meteor echoes)等。瞬态干扰远强于目标回波,但比起地或海杂波来,并不很强。为此,滤除瞬态干扰应在滤除地和海杂波的情况下,用门限检测并加以挖除,对地和海杂波背景有不同方法。对地杂波背景,先对各个距离和方位单元的回波信号作傅立叶变换,得到各单元的多普勒分布,在频域抑制陆地杂波所占的多普勒频谱,再通过逆傅立叶变换返回信号域,根据一定的门限,检测瞬态干扰,在原始回波(未滤除地杂波)中挖除存在瞬态干扰处的回波,并通过内插补上挖除点的值;对海杂波的多普勒谱要稍宽一些,但在相邻距离和方位单元里有很强的相关性,而瞬态干扰的相关性弱,首先根据一些相邻距离和方位单元估计接收信号的短期时变协方差矩阵,通过 MTI 滤波(对协方差矩阵作特征值分解,信号向最小特征矢量上的投影得到,将在下面讨论)消除海杂波,然将其输出与给定门限相比较,检测瞬态干扰,在原始回波(未滤除海杂波)中挖除存在瞬态干扰处的回波,再根据 Burg 方法恢复挖除点的回波值,根据这个原理,可以对改善后的回波序列重新估计短期协方差阵,重复进行滤波、检测、挖除和恢复。

下面先讨论 MTI 滤波。假设已知 Q 个距离单元 M 个方位单元在某时刻已知 P 个周期的杂波数据,即可利用单元共有 QM 个,假定某分辨单元第 n 时刻的前 P 个周期的杂波数据构成矢量, $x_{i,n} = [x_i(n-P+1), \dots, x_i(n-1), x_i(n)]^T$ (i 为距离-方位分辨单元数, $i = 1, \dots, QM$),则估计的杂波的时变(第 n 时刻)协方差矩阵定义为,

$$R_x = \frac{1}{QM} \sum_{i=1}^{QM} x_{i,n} x_{i,n}^T \quad (1)$$

将 R_x 作特征分解,将其特征值按大小排列为 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_p$,其中 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ 值明显大的若干个(设为 r)特征值对应的特征矢量所张成的空间为杂波子空间(习惯称为信号子空间,这里的“信号”实际是杂波),以 S_1, S_2, \dots, S_r 表示之;而余下的 $P-r$ 个特征矢量张成噪声子空间,以 G_1, G_2, \dots, G_{P-r} 表示之。这里大特征值个数根据特征值自动判别,首先将特征值取对数,对其统计分类就可确定大特征值数目 r 。

将任意输入数据矢量 $X (= x_{i,n})$ 作 MTI 滤波,即将 X 在杂波子空间的分量滤除,可计算矢量 X 在杂波子空间的该投影分量为

$$X_r = \sum_{i=1}^r S_i^H X S_i \quad (2)$$

通过 MTI 滤波输出为

$$X_0 = X - X_r = X - \sum_{i=1}^r S_i^H X S_i \quad (3)$$

输出信号里杂波被滤除,而大部分瞬态干扰则保留下来,这时将出现一段强度比较强的“突起”,通过检测是否存在“突起”来判断是否存在瞬态干扰,一般来说,如果存在一个区间其相对功率比整个区间的平均相对功率强 15dB,可认为存在“突起”,即存在瞬态干扰.检测出瞬态干扰后,从滤波前的信号中将瞬态干扰挖除.为了避免挖除处杂波的突变而使杂波谱展宽,应按杂波的特性对挖除的点作插值处理.内插后可以部分恢复海杂波,噪声以及回波信号.本文采用 AR 模型预测内插,AR 模型系数采用 Burg 算法估计.

Burg 算法是通过前 N 点的采样序列 x_0, x_1, \dots, x_{N-1} , 估计 AR 模型参数 $a_{p,k}, (k=1, 2, \dots, p)$, 预测第 N 个采样点 x_N , 有下列关系:

$$\hat{x}_N = - \sum_{k=1}^p a_{p,k} x_{N-k} \quad (4)$$

其中 p 是 AR 模型的阶数.通过莱文生-杜平递推公式计算 AR 参数

$$a_{p,k} = a_{p-1,k} + a_{p,p} a_{p-1,p-k}^* \quad (5)$$

其中 $a_{p,p}$ 由下式给出

$$a_{p,p} = k_p = \frac{-2 \sum_{n=p}^{N-1} (f_{p-1,n} b_{p-1,n}^*)}{\sum_{n=p}^{N-1} [|f_{p-1,n}|^2 + |b_{p-1,n-1}|^2]} \quad (6)$$

在用式(6)计算时,分母部分的求和式有下面的递推关系,

$$DEN(p) = \sum_{n=p}^{N-1} (|f_{p-1,n}|^2 + |b_{p-1,n-1}|^2) = DEN(p-1) \cdot (1 - |a_{p-1,p-1}|^2) - |f_{p-1,p}|^2 + |b_{p-1,N-p}|^2 \quad (7)$$

式中 $DEN(p)$ 表示式(7)的分母多项式.通过式(5)~(7),可以确定 AR 模型的一组参数 $\{ a_{p,k} \}$, 其中 AR 模型的阶数预先给定.

针对不同的杂波背景,瞬态干扰滤除的整个处理框图用图 1 表示.从理论上说,地杂波的谱比较窄,但在相邻单元的空间相关性要弱一些,直接在各自的频域滤除就比较合适,对海杂波,其谱比较宽,相邻单元的空间相关性很强,通过海杂波协方差阵估计,并滤除的方法比较合适.在实际应用中,并不是要完全滤除海杂波和地杂波,而是以能检测出瞬态干扰为目的,图 1 中处理框图可以相互适用.

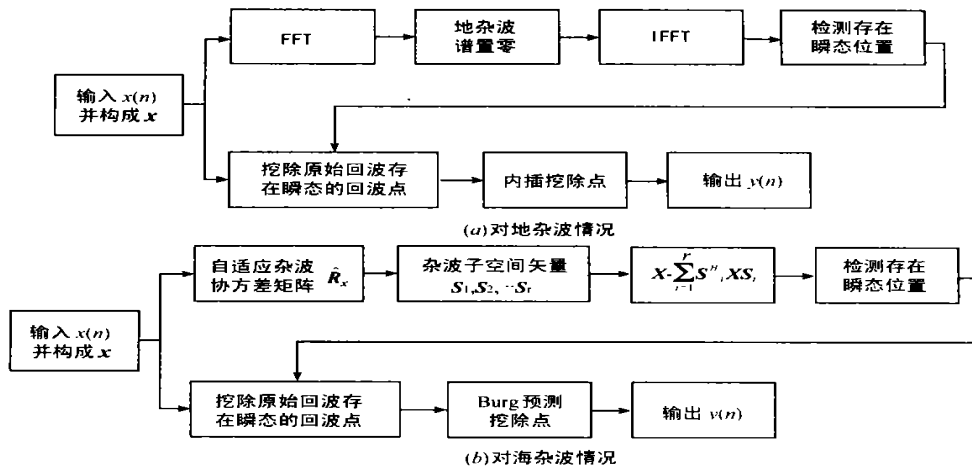


图 1 瞬态干扰的检测和消除框图

对于流星余迹回波它通常只在一个距离单元,一个波束中存在,闪电冲击存在于某个波束的全部距离单元中,海(地)杂波在所有的距离单元和方位单元中存在.流星余迹回波和闪电冲击虽然在一个或所有距离单元中的强度很大,但将它平均到整个距离方位单元中,它所占的成分与海地杂波相比就小,所以 R_x 主要就是海(地)的协方差阵.

4 实测数据的处理

对 OTHR 录取的原始数据处理中,在海(地)杂波滤除后,在某数据中发现流星余迹回波.图 2(a)是某实测数据段某个波束第 i 个距离单元的各次回波,在 6~8 秒之间回波变化比较剧烈,可以断定有偏离零频的频率成分,图 2(b)为其傅立叶谱(作傅立叶变换后作了除以数据长度的归一化),图 2(g)为它的零频附近的局部放大图,可以看出,在多普勒频率 - 0.4Hz 和 0.5Hz 上有两个相对功率分别为 81.45dB 和 83.50dB 的海杂波 Burg 双峰,两 Burg 之间 0.1Hz 上也有一个

相对功率为 76.18dB 峰,估计为地杂波谱,电离层的相位扰动使多普勒平移 0.1Hz. Burg 峰有一定展宽,可推测此方位和距离单元位于海陆分界处,在频率 1.464Hz,有相对功率为 73.54dB 的峰,可能为舰船目标回波谱.在多普勒频率 - 5.9Hz 到 - 1.66Hz 之间有一个突出的“包”,后面处理将发现为流星余迹回波的谱.图 2(c)为采用特征矢量方法滤除杂波后恢复到数据域的各次回波,在第 640 次回波到第 755 次回波,即 6.4 秒到 7.55 秒,有一个冲击干扰,持续时间为 1.15 秒.从图中也可以看出平均背景噪声相对功率为 65dB 左右,流星余迹回波的相对功率最大达 90dB,比噪声强 15 - 25dB,比较图 2(a)和图 2(c),也可见海(地)杂波要比噪声强 20dB;图 2(d)为冲击干扰滤除,并用 Burg 方法内插后各次回波,比较图 2(d)和图 2(a),在流星余迹回波处的信号快变已消除,回波也比较连续,突跳消除了,另外,在处理中发现,在同一个距离单元的左右相邻的两个波束有相对比较弱的流星余迹回波,可以断定是旁瓣进入的同个流星余迹回波;图 2(e)为在原始信

号中挖除存在流星余迹回波的点,但不作内插时得到的傅立叶谱,因为回波中存在一段零值点,使零频附近的频谱大大展宽,对舰船目标检测不利;图 2(f) 为对原始信号挖除流星回波点,但用 Burg 方法内插后得到的谱,可以看出,海(地)杂波谱没有展宽,比较图 2(f) 和图 2(b),流星余迹回波的谱消除

了,可以看出,流星余迹谱有一定谱宽,也有一定的多普勒平移,这里谱宽为 4.24Hz,多普勒中心平移为 3.78Hz. 通常舰船目标的多普勒频率是比较低的,回波的强度比较弱,如果其多普勒频率在 - 5.9Hz 和 - 1.66Hz 之间,其多普勒谱将会被流星余迹掩盖,使之不能被检测.

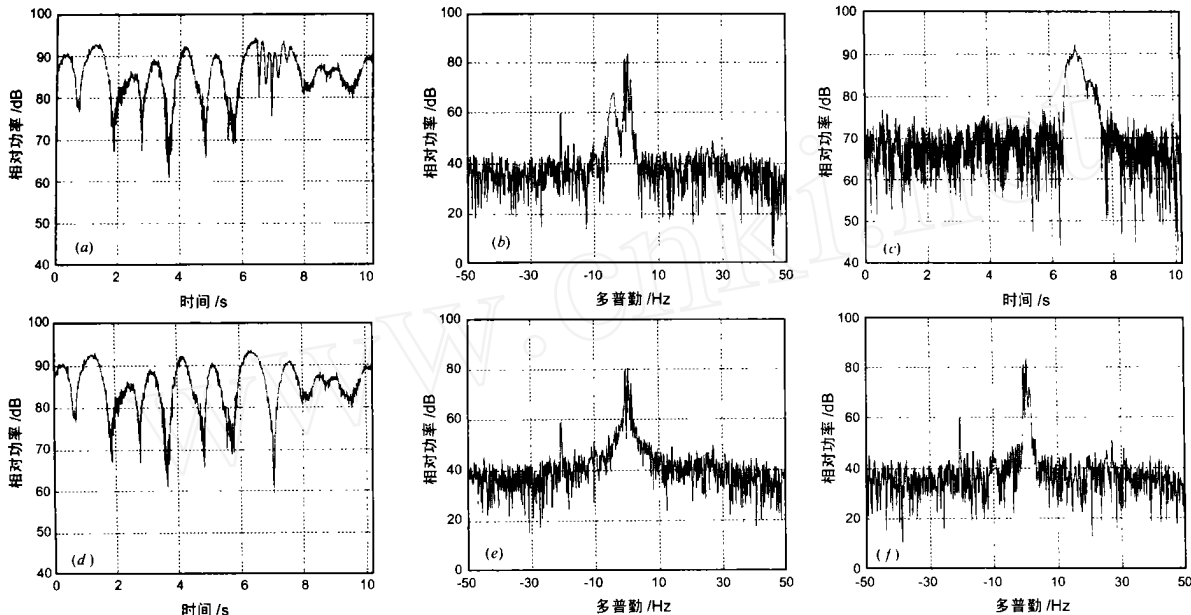


图 2 实测信号的流星余迹回波干扰的滤除

5 小结

本文提出采用特征分解方法滤除海(地)杂波后,检测出瞬态干扰位置并挖除这些位置的点,然后用内插保持杂波连续性的方法,该方法在消除瞬态干扰同时,对杂波谱的影响小,有利于低速目标检测.在用所提出的方法处理实测数据中,发现了流星余迹回波,并且滤除效果良好.

参考文献:

[1] S J Anderson , Y I Abramovich. 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 .
 [2] James R , Barnum , Erik E Simpson. Over-the-horizon radar sensitivity enhancement by impulsive noise excision [A] . 1997 IEEE National Radar Conference [C] . Syracuse , NY , USA : 1997 . 252 - 256 .

作者简介:



邢孟道 男,1975 年 11 月生于浙江嵊县,1997 年本科毕业于西安电子科技大学,同年免试推荐为该校雷达信号处理重点实验室硕博连读生.主要研究方向:雷达成像、目标识别和天波超视距雷达信号处理. E-mail : xmd @rsp . xidian . edu . cn



保 铮 男,1927 年 12 月生于江苏南通,1953 年毕业于中国人民解放军通讯工程学院,现为中国科学院院士,中国电子学会会士,研究领域为雷达信号处理及现代信号处理.