

文章编号: 2095-4980(2015)01-0031-04

基于介质透镜的太赫兹引信天线技术

张立东, 戴作杏

(电磁散射重点实验室, 上海 200090)

摘要: 介绍了太赫兹频段引信天线的优缺点与背景需求。为实现太赫兹频段引信天线工程应用, 分析了介质透镜天线在太赫兹频段的工作原理及应用特点, 采用 H 面喇叭嵌装介质透镜天线形成太赫兹频段引信天线, 可以有效缩短 H 面喇叭天线的纵向尺寸。并利用透镜的偏焦技术形成不同波束倾角的引信天线, 对不同波束倾角的太赫兹引信天线进行了仿真计算, 仿真计算结果验证了该技术方案的可性。

关键词: 太赫兹; 介质透镜; 仿真; 引信天线

中图分类号: TN821

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201501.0031

Terahertz fuze antenna technique based on dielectric lens

ZHANG Lidong, DAI Zuoxing

(Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Shanghai 200090, China)

Abstract: The background requirements of the fuze antenna in terahertz spectrum as well as its advantages and disadvantages are introduced. The working principles and application characteristics of dielectric lens antenna in terahertz frequency are analyzed in order to implement the terahertz fuze antenna. The longitudinal size of H plane horn antenna can be reduced effectively by using fuze antenna formed by an H plane horn with dielectric lens antenna. The terahertz fuze antenna with different beam angles is achieved by focal technology of lens. The feasibility of the technology solution is verified through simulation.

Key words: Terahertz; dielectric lens; simulation; fuze antenna

太赫兹波介于微波与红外之间, 既具有微波与红外的优点, 又能克服它们的弱点, 其所处的特殊电磁波谱位置使其具有许多优越的特性, 比如宽带性、方向性、有选择的传输穿透性、光谱分辨性、低能性等等。特别是频率高于 100 GHz 的太赫兹波对于等离子体具有良好的穿透性, 因而在光谱学、通信、雷达、成像等领域具有广泛应用前景, 有重要的学术和应用价值, 世界发达国家争相将太赫兹技术列为战略性科技方向^[1-2]。

对于临近空间高超音速飞行器及弹道导弹再入段高速飞行中产生的等离子鞘套, 低频段的电磁波很难穿透, 因而工作在常规频段的雷达对于高超音速飞行器探测概率较低。由于太赫兹波对于等离子体具有良好的穿透性, 太赫兹主动探测将成为反临近空间目标弹载雷达设备的主要探测手段之一, 因而太赫兹引信技术也将成为对付这些高速目标的主要引爆方式之一。由于太赫兹波的宽带性、方向性与低能性, 采用太赫兹频段的引信可以大大提高其抗干扰性能。因此, 开展太赫兹频段引信天线技术的研究十分重要。

1 太赫兹频段引信天线技术要求

引信天线的作用就是把引信发射机发射的电磁波信号辐射到自由空间, 形成图 1 所示的增益方向图, 当天线主波束照射到目标并经目标散射后, 由同样波束形状的天线接收, 经引信信号处理, 最终形成引信起爆信号。

常规的引信天线一般采用线阵天线形式, 要求单根线阵天线可以形成图 1 所示方向图。根据导弹弹体的直径, 以及引信天线的工作频段、横截面波束宽度情况, 把 2~4 根同样的线阵天线, 周向均匀安装在弹体外壁形成天线阵列, 天线阵列合成方向图为可以周向包络 360°的圆锥形波束(如图 2 所示)。引信总体根据弹目交会相对速度确定圆锥形波束的开口大小, 即 θ 角的大小, 根据对天线增益的需求, 确定引信天线半功率波束角 $\theta_{0.5}$ 数值的大小。

收稿日期: 2014-10-10; 修回日期: 2014-11-27

天线增益要求越高,引信天线半功率波束角 $\theta_{0.5}$ 的数值越小;天线增益要求越低,引信天线半功率波束角 $\theta_{0.5}$ 的数值越大。

形成图1所示增益方向图的天线形式较多,在微波频段,一般采用波导缝隙线阵天线或微带线阵天线等得到满足要求的增益方向图。但在太赫兹频段,即使在该频段的低端,其传输波导的横截面尺寸仅为1 mm左右,随着频率的升高,波导尺寸更小,要在这么小的波导上设计加工波导缝隙线阵天线,比较困难^[3]。同样,太赫兹频段微带线阵天线的设计加工难度也极大。

H面喇叭天线也可实现图1所示波束方向图,而且喇叭天线的设计、加工制造相对比较简单,缺点是难于控制好喇叭天线口面上的最大工作相差^[4-5],常规H面喇叭天线的纵向长度会比较长,给天线的安装及工程应用带来困难。为解决这个问题,一般在喇叭天线的口面上嵌装透镜进行调相,就可以有效地控制喇叭天线口面上的最大工作相差,大大缩短喇叭天线的纵向长度,解决喇叭天线的安装及工程应用问题。而且,太赫兹波接近于光波,透镜技术早已在光波领域得到广泛应用。光学的聚焦与成像大多采用介质透镜来实现,与此类似,太赫兹波段的聚焦与成像也完全可以采用透镜来实现。

2 透镜

常用透镜可以分为2种型式:加速透镜与延迟透镜^[6]。

2.1 加速透镜

加速透镜媒质使电磁波射径的电长度减小,因而一般电磁波通过其中的相速 v_p 大于光速,即等效折射率为 $n=c/v_p < 1$,典型的有E面金属板透镜;在分米波与厘米波波段,常用E面金属板加速透镜天线,金属板加速透镜由一些平行的金属板排列而成,电磁波通过这种透镜时,类似于电磁波在波导中传输一样。当电场矢量平行于金属板时,电磁波通过其中的相速 v_p 大于光速。假定金属板间距为 t ,则

$$v_p = c / \sqrt{1 - [\lambda_0 / (2t)]^2} \quad (1)$$

式中: c 为光速; λ_0 为自由空间波长。

平行金属板透镜的 $n=c/v_p < 1$,由公式1可知,其折射率 n 与波长及金属板间距相关,因而具有频率敏感性,从而其工作频带相对较窄,一般折射率 $n=0.5$ 时,其相对工作频带宽度约为5.5%左右。而且在太赫兹频段,控制金属板间距 t 的尺寸精确度要求较高,工艺实现比较困难,故在太赫兹频段,一般不采用E面金属板加速透镜天线型式。

2.2 延迟透镜

延迟透镜媒质使电磁波射径的电长度增大,因而一般电磁波通过其中的相速 v_p 小于光速,即 $n=c/v_p > 1$,典型的有介质透镜等。同时,介质透镜天线的加工精确度要求不高,材料成本与加工成本都较低。

在毫米波段,特别是频率上升到太赫兹频段时,已经接近光波段,介质透镜(即延迟透镜)应用十分广泛。此时,介质透镜天线的分析方法可以采用准光波分析方法,其基本原理与光透镜原理类似。一般地,介质透镜形状是根据几何光学中的费马原理和斯奈尔折射定理设计的。根据使用需要,介质透镜天线可以设计成多种形式,单面透镜有1个面为平面,易于分析,这里就单曲面透镜形式

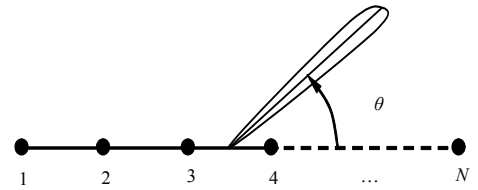


Fig.1 Schematic diagram of linear array antenna beam pattern

图1 线阵天线方向图示意图

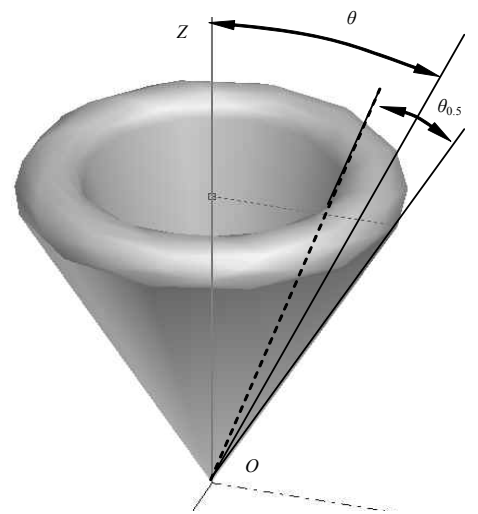


Fig.2 Schematic diagram of the fuze antenna synthetic beam pattern

图2 引信天线合成方向图示意图

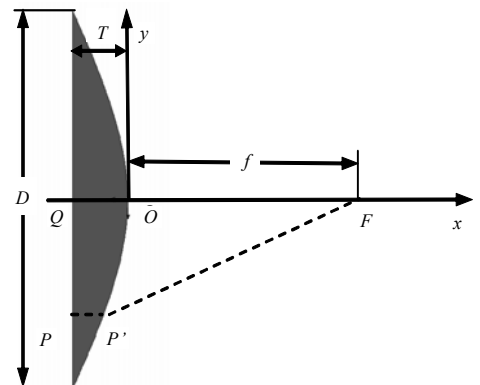


Fig.3 Schematic diagram of dielectric lens

图3 介质透镜示意图

加以分析,具体如图 3 所示。

根据透镜的等光程原理,由图 3 得知,当平面波沿 x 轴方向入射时,要在 F 点聚焦,需经过透镜曲面上任一点 $P'(x,y)$ 的光程 $nPP'+FP'$ 与沿轴线的光程 $nQO+f$ 相等,则可以得到透镜曲面上点 $P'(x,y)$ 的直角坐标方程:

$$(n^2 - 1)x^2 + 2(n - 1)fx - y^2 = 0 \quad (2)$$

式中: x,y 分别为 $P'(x,y)$ 点的坐标; n 是透镜的折射率; f 为透镜的焦距。由式(2)可知,介质透镜的曲面方程取决于透镜的折射率与透镜的焦距^[7]。

3 太赫兹频段介质透镜引信天线

如前所述,在喇叭天线口面嵌装介质透镜进行调相,可以大大缩短喇叭天线的纵向尺寸,方便工程应用。即采用 H 面喇叭天线口面嵌装介质透镜的天线形式可以实现太赫兹频段介质透镜引信天线。喇叭天线增益计算公式如下:

$$G = 10 \log \left[\eta (4\pi AB / \lambda^2) \right] \quad (3)$$

式中: G 表示天线增益; η 表示天线效率; A 表示喇叭口面的长边尺寸; B 表示喇叭口面的短边尺寸; λ 表示天线工作波长。由式(3)可见天线增益主要与喇叭口面尺寸及工作波长相关。假定天线工作于 0.3 THz, $A \times B = 30 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 按 $\eta = 30\%$ 的效率计算。介质透镜拟采用折射率 $n=1.87$ 的聚酰亚胺材料,其物理性能稳定,能耐一定的高温,并且易于加工。由此利用公式(2)即可确定单曲面透镜的尺寸并建立介质透镜引信天线模型(如图 4 所示)。

由图 4 可见,太赫兹点源在透镜焦点处发出的球面波,经过透镜后形成了平面波,从而可以提高天线的方向性,形成所需的天线主波束。据文献介绍,透镜天线的焦距与透镜的直径相当时,效率较高^[4]。即嵌装透镜后,喇叭式引信天线的长度与口径尺寸大小相当,约为 30 mm 左右。而不加装透镜的喇叭天线长度至少为

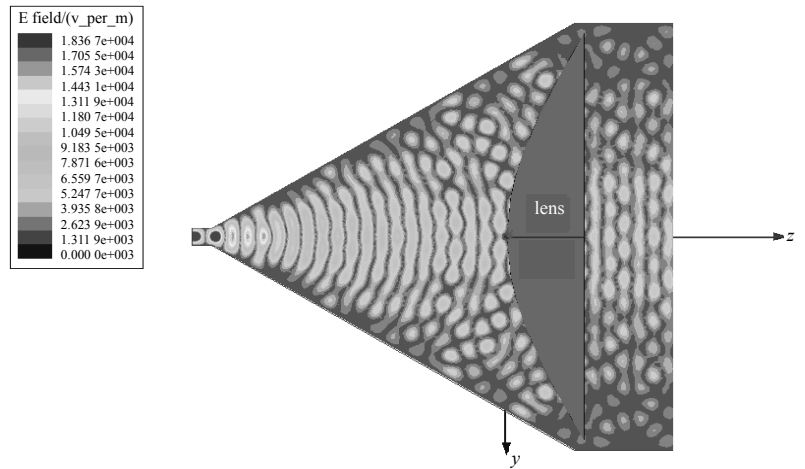


Fig.4 Simulation model of fuze antenna with dielectric lens and electromagnetic field distribution nephogram

图 4 介质透镜引信天线仿真模型及电磁场分布云图

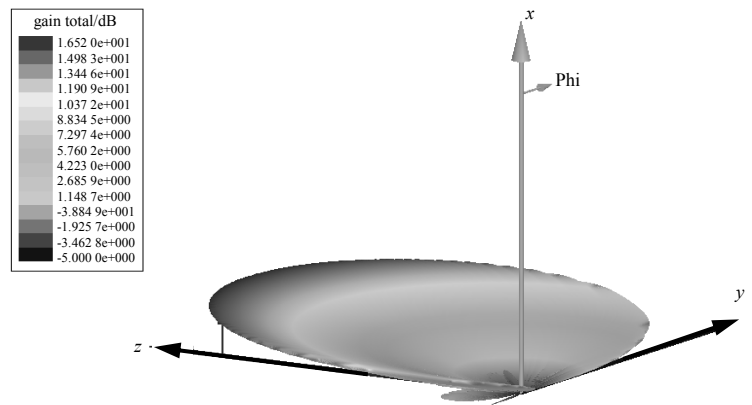


Fig.5 Main beam of fuze antenna with dielectric lens

图 5 介质透镜引信天线主波束图

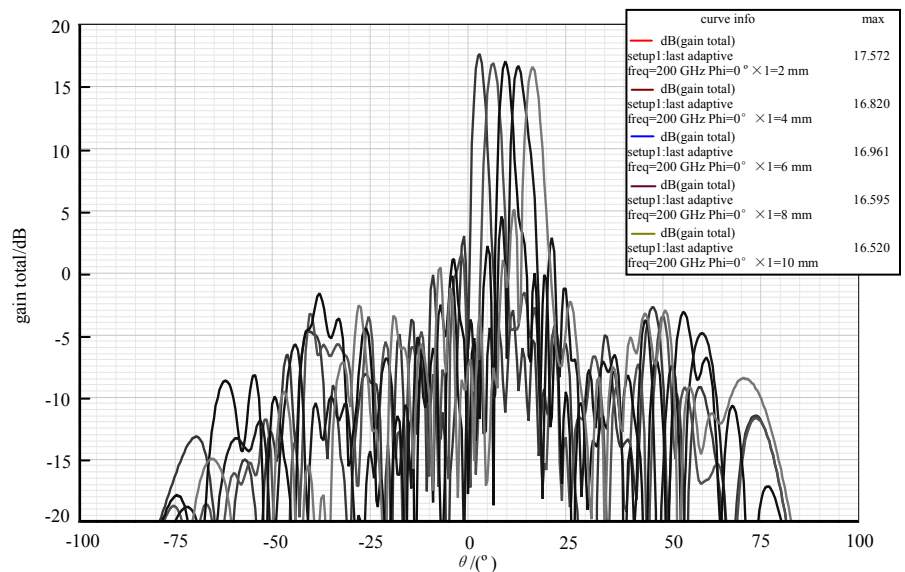


Fig.6 Adjustment about main beam's angle for fuze antenna with dielectric lens

图 6 介质透镜引信天线主波束倾角调整

喇叭口径尺寸的3倍以上。

仿真计算得到单个H面喇叭透镜引信天线的主波束如图5所示,可见只需2个同样的天线主波束即可合成图2所示的圆锥形波束,满足引信总体对引信天线的增益方向图要求。

根据透镜天线的特点,在焦平面内移动太赫兹点源的位置,还可以进一步控制天线主波束的倾角变化^[8],从而满足引信总体对引信天线不同主波束倾角的需求。具体如图6所示(图中给出的波束倾角分别为 $3^\circ, 6^\circ, 9^\circ, 13^\circ, 17^\circ$)。由图6还可以看出,馈源偏焦以后,透镜天线的主波束增益会有所降低,这在介质透镜引信天线的设计当中需引起注意。

4 结论

通过对太赫兹频段引信天线技术要求的分析,指出采用波导缝隙线阵天线及微带线阵天线等常规形式实现太赫兹频段引信天线的难度极大。根据H面喇叭天线的方向图特点,结合透镜的调相功能,提出采用H面喇叭嵌装透镜的天线形式实现太赫兹频段引信天线的功能,大大降低了太赫兹频段引信天线的设计、加工以及制造难度,仿真计算结果验证了该技术方案的可行性,为太赫兹频段引信天线的工程化应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社,2007:4-6. (XU Jingzhou,ZHANG Xicheng. The Technology and Application of Terahertz Science[M]. Beijing:Peking University Press, 2007:4-6.)
- [2] 王少宏,许景周,汪力,等. 太赫兹技术的应用及展望[J]. 物理,2001,30:612-615. (WANG Shaohong,XU Jingzhou,WANG Li,et al. The application and prospect of THz technology[J]. Physics, 2001,30:612-615.)
- [3] 郑新,刘超. 太赫兹技术的发展及在雷达和通讯系统中的应用(II)[J]. 微波学报,2011,27(1):1-5. (ZHENG Xin,LIU Chao. Recent development of THz technology and its application in radar and communication system(II)[J]. Journal of Microwaves, 2011,27(1):1-5.)
- [4] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京:电子工业出版社,2002:531-589. (LIN Changlu. Antenna Engineering Handbook[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2002:531-589.)
- [5] 姚远,俞俊生,陈晓东. 太赫兹超高斯波纹喇叭天线设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2014,12(4):487-490. (YAO Yuan,YU Junsheng,CHEN Xiaodong. Design of terahertz ultra Gauss corrugated horn antenna[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(4):487-490.)
- [6] 约翰·克劳斯. 天线(下册)[M]. 北京:电子工业出版社,2006:140-155. (John Klaus. Antenna(II)[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2006:140-155.)
- [7] 张立东,戴作杏. 一种太赫兹透镜聚焦天线技术研究[C]//2013年卫星有效载荷技术学术年会论文集. 西安:[s.n.],2013:234-237. (ZHANG Lidong,DAI Zuoxing. Study on a focal antenna technology based on terahertz lens[C]// Proceedings of Annual Conference on Satellite Payload Technology,2013. Xi'an,China:[s.n.], 2013:234-237.)
- [8] 刘传全,关福宏,孙晓玮. 毫米波多波束介质透镜天线设计[J]. 计算机仿真,2011,28(12):92-95. (LIU Chuanquan,GUAN Fuhong,SUN Xiaowei. The design of multi beam millimeter-wave dielectric lens antenna[J]. Computer Simulation, 2011,28(12):92-95.)

作者简介:



张立东(1972-),男,江苏省海门市人,理学学士,研究员,主要从事天线设计与微波技术研究.email:zld207@sina.com.

戴作杏(1981-),男,江苏省泰兴市人,博士,主要从事天线设计与微波技术研究.