

新北市政府111年度自行研究報告

數位無線電系統涵蓋率受地形地貌變化之影響改善方案研析
-以淡海輕軌為例

研究機關：新北市政府捷運工程局

研究人員：陳仲威

研究期程：111年1月1日至111年11月30日

新北市政府111年度自行研究成果摘要表

計畫名稱	數位無線電系統涵蓋率受地形地貌變化之影響改善方案研析-以淡海輕軌為例
期程	111年1月1日至111年11月30日
經費	無
緣起與目的	<p>隨著新北市轄區都市計劃蓬勃發展，輕軌規劃及建設在長達5至7年的工程施作後，於建設初期所進行無線電場強量測，常面臨到沿線高樓住宅與商場陸續興建問題，導致後期無線電系統建置完成後系統涵蓋率受影響。因此本研究針對數位無線電系統涵蓋率受地形地貌變化之影響提出改善方案，期望在符合輕軌路線規劃下，以因應未來無論地形地貌如何變化，也能維持系統之穩定，有助於減少外在環境發展對數位無線電系統影響之規劃設計方式。</p>
方法與過程	<ol style="list-style-type: none"> 1. 以淡海輕軌為例，分析因面臨淡海新市鎮的開發，鄰近建物阻擋數位無線電系統發射路線，致營運通車後陸續發生部分區域涵蓋率不足之狀況。 2. 觀察淡海輕軌一期工程改善方案之成效，並蒐集他案數位無線電系統設計與建置方式，並歸納有效的設計方法。 3. 綜整前述資料，以滿足數位無線電系統涵蓋範圍確實延伸至輕軌路線上，在未來規劃之輕軌路線，提出可降低鄰近區域開發對數位無線電系統涵蓋率造成影響之規劃設計方式。

<p>研究發現及建議</p>	<p>觀察淡海新市鎮多元開發及各路段周邊開發時程不同，數位無線電系統為有效因應鄰近區域開發之影響並維持其涵蓋率，建議於規劃設計之初即採用將數位無線電訊號以指向性發送至輕軌路線上，在路線轉彎處與輕軌相關建物增設中繼台、漏波電纜及天線等方式確保其涵蓋率達到營運要求。</p>
<p>備註</p>	

摘要

隨著新北市轄區都市計劃蓬勃發展，輕軌規劃及建設在長達5至7年的工程施作後，於建設初期所進行無線電場強量測，常面臨到沿線高樓住宅與商場陸續興建問題，導致後期無線電系統建置完成後系統涵蓋率受影響。本研究以淡海輕軌為例，分析因面臨淡海新市鎮的開發，鄰近建物阻擋數位無線電系統發射路線，致營運通車後陸續發生部分區域涵蓋率不足之狀況。觀察淡海輕軌一期工程改善方案之成效，並蒐集他案數位無線電系統設計與建置方式，並歸納有效的設計方法。數位無線電系統為有效因應鄰近區域開發之影響並維持其涵蓋率，建議於規劃設計之初即採用將數位無線電訊號以指向性發送至輕軌路線上，在路線轉彎處與輕軌相關建物增設中繼台、漏波電纜及天線等方式確保其涵蓋率達到營運要求。

關鍵字：數位無線電系統涵蓋率、場強鏈路傳遞損失、Hata 模型

目錄

<u>新北市政府111年度自行研究成果摘要表</u>	i
<u>摘要</u>	ii
<u>目錄</u>	iv
<u>圖目錄</u>	v
<u>表目錄</u>	vi
<u>壹、 研究背景</u>	1
<u>貳、 研究問題</u>	3
<u>參、 無線電電波通訊系統功能探討</u>	3
<u>肆、 無線電涵蓋率問題分析</u>	5
<u>伍、 結論與建議</u>	26
<u>參考文獻</u>	28

圖目錄

圖 1	<u>淡海輕軌第一期運輸系統計畫概要圖</u>	1
圖 2	<u>場強鏈路計算概念圖</u>	7
圖 3	<u>整體室外上下行鏈接訊號強度涵蓋範圍裝備靈敏度-100dBm</u>	8
圖 4	<u>基地台所提供無線電手機複合無線電訊號量測圖</u>	9
圖 5	<u>淡海輕軌初始設計無線電中繼台涵蓋總圖</u>	10
圖 6	<u>淡海輕軌經地貌改變後無線電中繼台涵蓋總圖</u>	11
圖 7-1	<u>三鶯線捷運無線電基地台涵蓋範圍示意圖</u>	13
圖 7-2	<u>安坑輕軌無線電基地台涵蓋範圍示意圖</u>	14
圖 7-3	<u>台中線捷運無線電基地台涵蓋範圍示意圖</u>	15
圖 7-4	<u>汐東線捷運無線電基地台涵蓋範圍研議圖</u>	16
圖 8	<u>淡海輕軌增設無線電中繼臺佈置圖</u>	17
圖 9	<u>V07無線電系統實際安裝情形</u>	18
圖 10	<u>V26無線電系統實際安裝情形</u>	18
圖 11	<u>對應穿透損失對應之距離</u>	22

表目錄

表 1	<u>淡海輕軌數位無線電系統期初設計場強量測條件</u>	9
表 2	<u>淡海輕軌第一期路網藍海線104年至110年訊號強度數據</u> ...	12
表 3	<u>在 MTS1 基地台和 (MTP3250) 無線電手機於軌旁 TSS 室內使用的情況下之鏈路計算值</u>	20
表 4	<u>在 MTS1 基地台和 (MTP3250) 無線電手機於 V26 車站旁建築室內使用的情況下之鏈路計算值</u>	21
表 5	<u>V07/V26 場地 - 下行鏈路預算</u>	24
表 6	<u>V07/V26 場地 - 上行鏈路預算</u>	25

壹、研究背景

一、淡海輕軌運輸系統興建

淡海輕軌運輸系統分為二期興建，第一期路網包含綠山線紅樹林站至炭頂站(V01-V11)及藍海線淡水漁人碼頭站至台北海洋大學站(V26-V28)，第二期路網包含藍海線淡水站至淡水漁人碼頭站(V21-V26)。整體路網總長度共為13.99公里，共設20座候車站以及1座機廠。淡海輕軌完工後，提供淡北運輸走廊新穎、便捷及舒適的運具選擇，轉移私人運具使用輕軌運輸系統，紓解臺2線瓶頸交通問題，加速帶動淡水地區及淡海新市鎮城市風貌更新及區域發展。



圖 1 淡海輕軌第一期運輸系統計畫概要圖[1]

二、淡海新市鎮規劃

1992年（民國81年），內政部營建署為紓解台北都會區中心都市成長壓力，規劃總面積達1,756公頃之淡海新市鎮。2006年（民國95年）6月行政院經建會決議停止淡海新市鎮的後續開發，並一併縮小淡水新市鎮範圍至今已完成整地之446公頃土地，而這也是目前大家所熟知之淡海新市鎮範圍。

淡海新市鎮開發迅速，新建案逐年增加，加上近年來大型量販店、新市國小、淡水區聯合辦公大樓陸續進駐，周遭建築物新建導致無線電基地台訊號被遮蔽，無線電的衰減造成通訊系統涵蓋率不足及通話品質降低。

三、無線電通訊在捷運系統需求與應用

無線電系統在聯繫行控中心、群組列車、維修工程車時使用無線電手機語音、數據通訊或特殊廣播。有些軌道號誌系統甚至使用通訊式列車控制（CBTC）以無線電偵測列車的安全間隔來決定安全行駛速度，因此穩定的無線電通訊系統對於行車安全至關重要。

淡海綠山線通車後，新北捷運公司表示輕軌部分場站有訊號不佳的情形，後於藍海線初勘時正式提出無線電改善事項。經調查發現通訊系統涵蓋率受興建中建物影響逐漸嚴重，建物地貌與規劃當

時已發生重大變化，為了補償無線電訊號損失，並防止爾後捷運路線發生相同情形，因此進行本研究。

貳、研究問題

本研究以淡海輕軌為例，以淡海新市鎮開發後區域為範圍，研究對象為無線電基地台訊號場域，在補強無線電基地台訊號的過程中，歸納出如何將無線電基地台訊號涵蓋至整體輕軌路線的方法，並比對其他捷運路線的無線電基地台位置設計，歸納出捷運無線電系統業務的設置要點，訂定於業主需求書內，防止發生類似情況。

由於無線電基地台屬場強研究，係研究空間與有效強度關係，本研究概念上採取：空間幾何分析法、場強鏈路傳遞損失計算進行簡易評估；另實際分析法為淡海輕軌細部設計中請統包商所做的無線電涵蓋率模擬分析、現地場強量測及問題改善後場強鏈路傳遞損失計算（Hata 模型）驗證場強是否足夠。

參、無線電電波通訊系統功能探討

一、數位無線電系統概述

捷運運輸系統早期採取傳統式類比無線電系統，傳送時易受干

擾導致傳送後聲音品質不佳，且容易被盜拷或竊聽，後來全面改用數位無線電系統，傳送後的訊號容易辨別，且利用加密技術不容易被盜拷或竊聽，通訊者在不同區域利用現地基地台的頻率傳輸，各地基地台再將無線電訊號轉換成光訊號透過光纖傳輸系統傳輸，達到全區無線電通訊，這樣的技術使頻道接續時間快，等待時間短，頻道利用效率高。

由於無線電波需考量地形環境、建築物阻擋限制，在傳播過程中會因電波本身的傳播特性及周遭環境不同而產生衰減，且易受天候因素及路樹等物體反射，產生多重路徑效應(Multipath Effect)，多重路徑效應最終會造成訊號放大或衰減。而傳送端和接收端的相對運動，亦會使訊號產生都普勒效應(Doppler Effect)頻率偏移效果，增加訊號品質的不確定性或不穩定狀態。

二、影響數位無線電訊號參數

預測的涵蓋範圍，視系統及環境等二參數而定。系統因素如調整器功率、接收器靈敏度、天線增益、天線高度、傳送線路損耗、頻率、裝備靈敏度。環境因素如建築物、地形變化、噪音、大氣條件、樹木密度。

三、捷運通訊系統功能規範

無線電通訊系統在車站、機廠與維修工場區(含所有建物與設備)、行控中心(OCC)，每平方米應至少擁有95%的涵蓋範圍達到-90dBm 以上的場強；在軌道、鄰近軌道20公尺、列車內部於車門及窗戶關閉下，每平方米應至少擁有99%的涵蓋範圍達到-90dBm 以上的場強。

肆、無線電涵蓋率問題分析

一、無線電通訊系統傳輸理論

各基地台建立無線電場，場強隨場源的距離遞減，場域範圍被遮蔽物阻擋，傳輸損失模型係以無線電場能量(單位dBm)隨距離損失進行推算。

自由空間路徑損失(FSPL)是測量信號從發射器穿過自由空間環境到達接收器時所產生的損耗，地貌影響衰減距離常數，其中又以高頻訊號損失較多自由空間路徑損失的方程式如下：

$$\begin{aligned} \text{FSPL(dB)} &= 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right) \\ &= 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.45 \end{aligned}$$

d 代表距離 (km) f 代表信號頻率 (MHz)

天線在某個指定方向上輻射功率為有效全向輻射功率(EIRP)，理想狀態下等於發射器的發射功率(dB值)+天線增益(dB值)。功率損失部分全向型天線大於指向形天線。

結合有效全向輻射功率自由空間路徑損失可計算無線電發射機至接收機之間功率的損失和增益為鏈路計算(如圖2)後，與目標接收器敏感度(SRX)判斷理想狀態下的場強需求，其中發射功率不同僅使曲線上下移動。鏈路計算的方程式如下：

$$(PT_x + GT_x - LT_x) - FSPL + (GR_x - LR_x) \geq SR_x$$

PT_x = 發射器輸出功率 (dBm)

GT_x = 發射器天線增益 (dB) (EIRP)

LT_x = 發射器損耗 (電纜和接口損耗 (dB))

$FSPL$ = 自由空間路徑損耗 (dB)

GR_x = 接收器天線增益 (dB) (EIRP)

LR_x = 接收器損耗 (電纜和接口損耗 (dB))

SR_x = 目標接收器敏感度 (dBm)

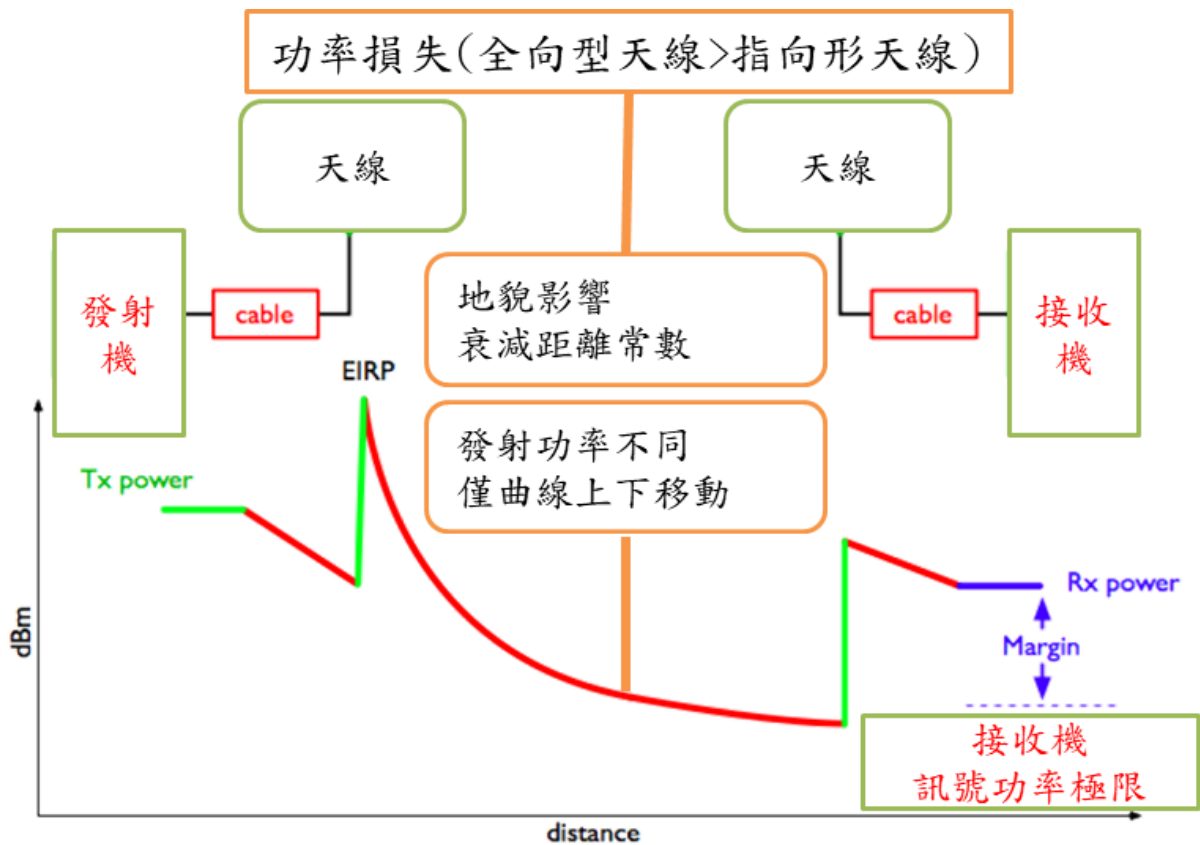


圖 2 場強鏈路計算概念圖

二、 設計初期無線電涵蓋率分析

分析方法一：模擬分析

設計初期以當時達到無線電整體覆蓋範圍下，統包商將無線電基地台地點設計於淡江大學(V04)、崁頂(V11)、沙崙(V27)，進行模擬如圖3，訊號強度涵蓋範圍均達到-90dBm以上，皆大於裝備靈敏度-100dBm，符合契約要求數位無線電系統通訊系統功能規範。

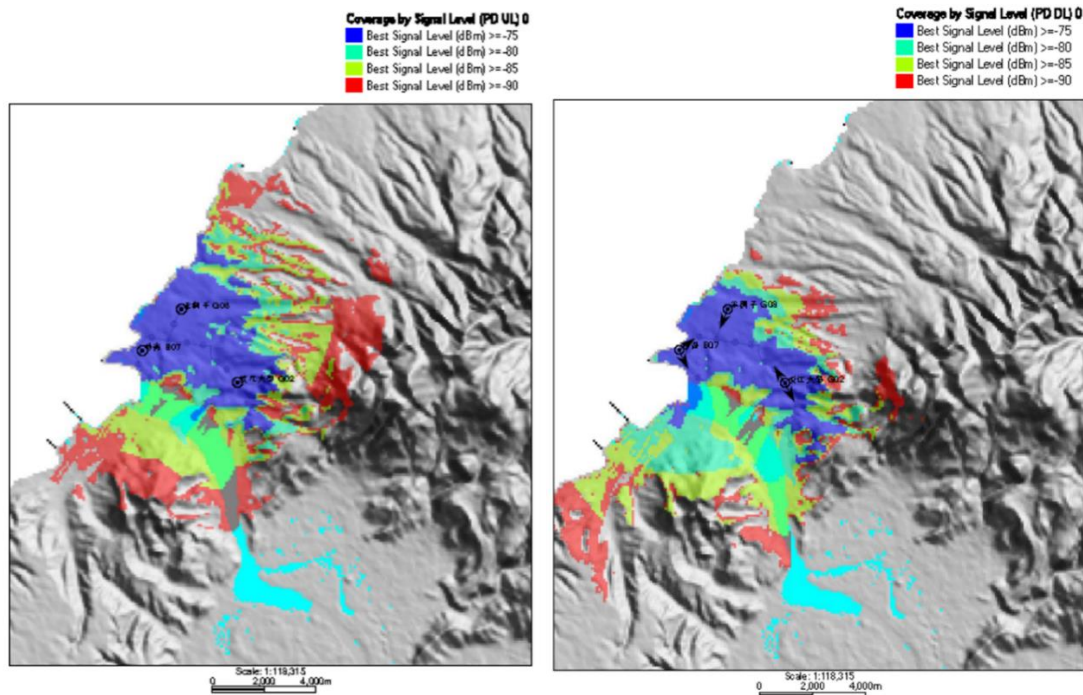


圖 3 整體室外上(左圖)下行(右圖)鏈接訊號強度涵蓋範圍(皆大於)裝備靈敏度-100dBm[4]

分析方法二：現地場強量測

統包商於期初設計階段，執行了駕駛測試，以紀錄沿著駕駛路線所有單元的發送功率，與TETRA信號的性質特性以及無線電頻道的參數等，來確認模擬的涵蓋區域地圖。

統包商於期初設計階段，將天線架設於各車站高度10m至30m的位置進行場強量測，如表1。場強量測如(圖4)區分為五種顏色類別：

- | | |
|---------------------------|----------|
| a) >-70.0 dBm | 橘色(場強良好) |
| b) -88.0 dBm to -70.1 dBm | 綠色 |
| c) -98.0 dBm to -88.1 dBm | 藍色 |
| d) -105 dBm to -98.1 dBm | 黃色 |

e) <-105 dBm

紅色(場強不足)

序號	站名	型式	預設天線離地高(m)	緯度	經度
1	V01	高架	20m	25° 9'18.81"N	121°27'32.17"E
2	V02	高架	20m	25° 9'43.58"N	121°27'22.42"E
3	V03	高架	20m	25°10'9.30"N	121°27'38.94"E
4	V04	高架	20m	25°10'36.53"N	121°27'22.18"E
5	V05	高架	20m	25°10'51.79"N	121°27'8.51"E
6	V06	高架	20m	25°11'0.83"N	121°26'54.47"E
7	V07	高架	20m	25°11'20.09"N	121°26'42.23"E
8	V08	平面	10m	25°11'22.97"N	121°26'14.71"E
9	V09	平面	10m	25°11'28.52"N	121°25'51.40"E
10	V10	平面	10m	25°11'47.90"N	121°25'58.10"E
11	V11	平面	10m	25°12'3.30"N	121°26'4.62"E
12	機廠	平面	30m	25°12'9.92"N	121°26'4.25"E
13	V28	平面	10m	25°11'28.15"N	121°25'34.16"E
14	V27	平面	10m	25°11'14.99"N	121°25'2.83"E
15	V26	平面	10m	25°10'56.33"N	121°25'10.42"E

表 1 淡海輕軌數位無線電系統期初設計場強量測條件



圖 4 基地台所提供無線電手機複合無線電訊號量測圖[4]

另依據現場無線電訊號涵蓋模擬結果，規劃以下三座基地台於

第一期路網的運作，幾何分析配置如圖5，無線電覆蓋率以面輪廓進行覆蓋，如輪廓面地形地貌無遮擋且無變化，此設計方法較省成本。

站台 1-機廠、炭頂(V11)：室外天線負責戶外無線電訊號涵蓋。室內天線負責室內無線電訊號涵蓋。

站台2-淡江大學(V04)：基地台搭配戶外天線。

站台3-竿蓁林(V02)：基地台搭配戶外天線。



圖 5 淡海輕軌初始設計無線電中繼台涵蓋總圖[1]

二、新設建物對無線電涵蓋率分析

經實際分析與檢討，建置在淡海輕軌機廠的無線電基地台受到主要影響，由其涵蓋範圍示意圖(幾何分析如圖6)可知，可能影響基地台涵蓋範圍的建物有「①美麗新淡海影城」、「②海洋都心」、「③名軒海樂地」與「④一森原」等建物，尤其以109年開始建置之「名軒海樂地」，影響第一期路網之藍海線 V26(B06淡水漁人碼頭)、V27(B07沙崙)及 V28(B08台北海洋大學)無線電系統使用最為顯著。



圖 6 淡海輕軌經地貌改變後無線電中繼台涵蓋總圖[1]

由表2訊號測試強度數據可知，104年及109年量測之藍海線無線

電訊號強度，均滿足無線電訊號強度之允收標準，此時「名軒海樂地」之興建高度尚未影響無線電訊號，隨著該建物之興建高度增加，110年量測之藍海線無線電訊號強度已有明顯涵蓋率不足情形。

藍海線訊號強度數據(2015~2021)						
測試地點	參考點	2015/7/20系統設計 階段場強佈設量測	2020/3/26 SAT		2021/2/24量測值	
			V09 to V26	V26 to V09	V09 to V26	V26 to V09
B01	濱海沙崙路口	-67	-63	-58	-55	-61
B02		-68	-59	-63	-69	-65
B03		-71	-58	-56	-72	-71
B04		-71	-58	-68	-75	-70
B05	V28車站	-73	-66	-75	-73	-74
B06		-77	-71	-83	-79	-79
B07		X	-78	-78	-79	-76
B08		X	-79	-79	-87	-82
B09	濱海路進鋼拱橋	X	-80	-83	-89	-89
B10		X	-81	-75	-80	-83
B11		X	-80	-70	-82	-79
B12		X	-72	-71	-79	-83
B13		X	-67	-73	-83	-85
B14		X	-74	-74	-81	-84
B15		-78	-81	-81	-82	-85
B16	V27車站	-83	-81	-83	-86	-80
B17		-83	-83	-84	-86	-96
B18		-82	-86	-86	-85	-87
B19		-90	-83	-89	-90	-90
B20	中正路和觀海路口	-89	-77	-88	-85	-90
B21		-88	-85	-88	-92	-88
B22		-88	-81	-87	-92	-90
B23		-85	-89	-89	-91	-93
B24	V26車站	-83	-76	-82	-98	-84
B25	V26車站	-82	-73	-74	-86	-79

表 2 淡海輕軌第一期路網藍海線104年至110年訊號強度數據[10]

三、 地貌改變因應對策無線電涵蓋率分析

(一) 其他路線之設計參考

1. 以三鶯線捷運為例，其無線電基地台與指向性天線設置於LB02站(LB02基地台涵蓋LB01~LB03)、三峽機廠(涵蓋LB04~LB05及機廠)、LB07站(基地台涵蓋LB06~LB08)、LB11站等4處(LB011基地台涵蓋LB09~LB12)，並於LB01、LB03、LB06、LB08、LB09、LB10、LB12 設置7處光中繼器，沿軌道發射訊號，以設計概念而言，無線電系統依路段線型、曲率及路線本身結構形式，以訊號沿著軌道鍊鎖狀佈設方式設計，即能不受周邊環境變化影響，且能涵蓋整個營運範圍，配置如圖7-1。並須考量沿線設備的安裝位置限制，因為設備種類多就需要更多的建置與維護成本。



圖 7-1 三鶯線捷運無線電基地台涵蓋範圍示意圖[6]

2. 以安坑輕軌為例無線電基地台設置於機廠 K01站、K05站、K09站，對於隧道1（機廠至 K1 車站），一個無線電雙向放大器(RF_BDA)將裝

於隧道1的出口處並接至發射全向天線以接收來自附近機廠及K1基地台之 RF 訊號。無線電雙向放大器(RF_BDA)還連接到漏波同軸電纜並與隧道八木天線端接，以提供戶外覆蓋無法覆蓋之室內軌道覆蓋範圍。對於 K5 車站至 K6 車站之間的不連續隧道（稱為隧道2 和隧道3），隧道內使用漏波同軸電纜，並透過耦合器和分配器連接到 K5雙MTS1基地台，以提供隧道2和隧道3內的無線電(RF)覆蓋，配置如圖7-2。



圖 7-2 安坑輕軌無線電基地台涵蓋範圍示意圖[7]

3. 台中線案例其無線電基地台設置於 G0站、G06站、G09站、G12站、

G16站5處，於基地台涵蓋區域內 G0站、G04站、G08站、G10站、G14站設置5處光放大器補強訊號強度，以軌道鍊鎖狀佈設(線輪廓最小成本)方案，覆蓋強度除路線末端之北屯機廠與高鐵銜接部為-70~-75dBm 外，其餘各區路線皆可得到-65dBm 以上之涵蓋，配置如圖7-3。



圖 7-3 台中線捷運無線電基地台涵蓋範圍示意圖[9]

4. 以淡海二期基本設計為例，經進行淡海二期無線電波量測(以天線8米)，如要滿足全區覆蓋(99%)，建議架設6座基地台及指向性戶外天線為宜，配置如圖7-4。基地台設置於 V21站旁，其餘設置於站間 V21站至 V22站間、V22站至 V23站間、V23站至 V24站間、V24站至 V25站間、V25站至 V26站間。設置站間緣由為經初步勘驗 V23與 V22間此處沿線有大量榕樹訊號不易覆蓋且易造無線電干擾，其後區域

應此狀況最佳化基地台及天線位置。



圖 7-4 淡海二期無線電基地台涵蓋範圍研議圖[8]

(二) 無線電涵蓋率建置概念：依據以上案例分析無線電訊號沿著軌道佈設來設計，每一基地台之涵蓋範圍與鄰近基地台涵蓋範圍重疊(沿線涵蓋)設計，確保單一基地台訊號不足時可轉換至另一基地台。無線電通訊系統設計前進行第一次場強量測，據此研擬基地台配置數量及有效覆蓋範圍，並於可靠度驗證(RAM)展現之後進行二次無線電涵蓋率檢視設計須符合規範要求。

(三) 對策分析

因應淡海輕軌綠山線和藍海線部分區域因周遭建築物新建導致

無線電基地台訊號被遮蔽而使得訊號日益衰減之狀況。本案於淡海輕軌現地進行數位無線電系統場強量測，針對量測數據及執行無線電訊號之補強改善，解決各別區域的無線電涵蓋率問題。依據本章三、(二)歸納之無線電涵蓋率建置概念，沿軌道建置基地台，鄰近基地台涵蓋範圍重疊，淡海輕軌增設無線電中繼臺佈置圖空間分析如圖8，評估如下：

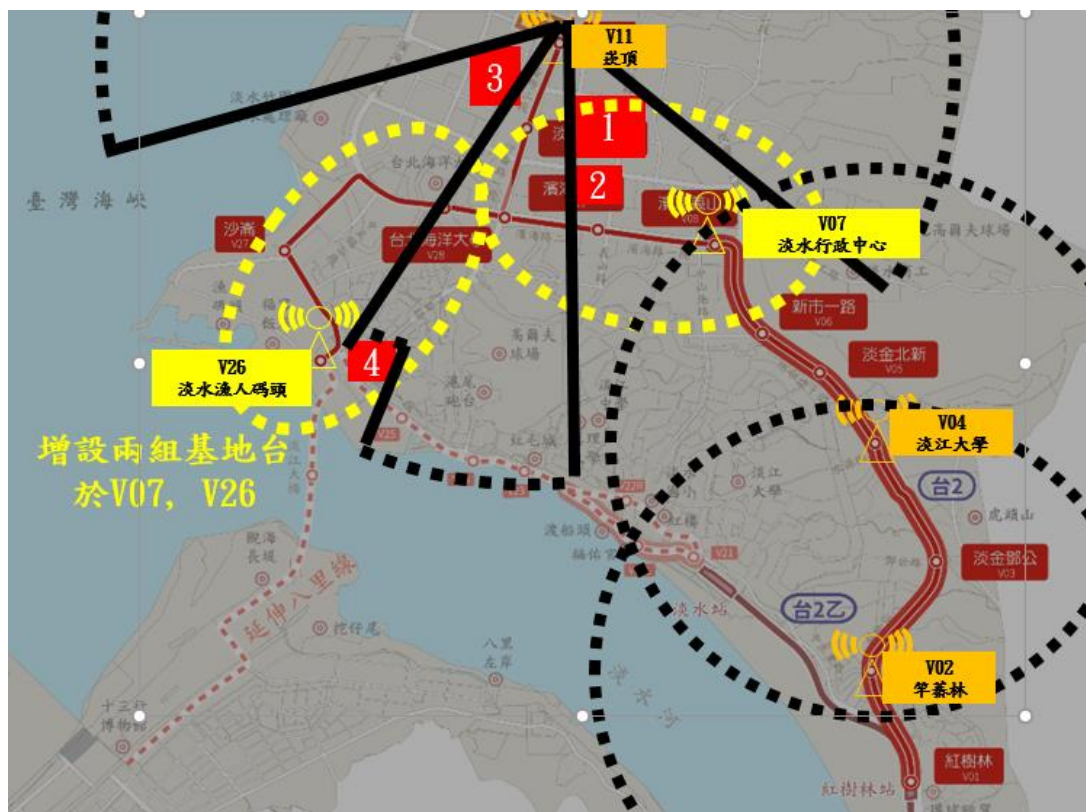


圖 8 淡海輕軌增設無線電中繼臺佈置圖[1]

(三) 無線電設備增設配置位置

A. V07車站設置一組 MTS1 基地台如圖9。

- a. 發射頻率為390.45 MHz(新增頻率)。
- b. 接收頻率為380.45 MHz(淡海輕軌直通頻率)。



圖 9 V07無線電系統實際安裝情形

B. V26車站設置一組 MTS1 基地台如圖10。

- a. 發射頻率為390.25 MHz(與 V04車站基地台相同)。
- b. 接收頻率為380.25 MHz(與 V04車站基地台相同)。



圖 10 V26無線電系統實際安裝情形

(四) 新增電台(基地台)前後涵蓋分析：

依據原設計內容辦理無線電系統涵蓋驗收測試，其實際量測結果，於 V01(G01紅樹林)車站地面層量測，可得該建築穿透損失接近原建築物損失設計參數10dB。考量室內涵蓋地點如下，且加入該地點之實際量測損失做鏈路計算：

TSS (牽引變電站)：穿透損失至少35 dB，鏈路計算在 MTS1 基地台和 (MTP3250)無線電手機，於軌旁 TSS 室內使用的情況如表3：

B06車站：站體內部隔間建築穿透損失至少20 dB，鏈路計算在 MTS1基地台和 (MTP3250) 無線電手機，於 B06車站旁建築室內使用的情況如表4：

為了計算每個基地台產生的雜訊，將採用 Hata 傳遞損失公式，已知 Hata 傳遞模型是眾所周知的經驗公式，且被採用於長距離的點對點傳遞損耗計算如下：

$$\text{Loss(dB)} = A + B * \log_{10}(d) - C$$

$$A = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(H_b) - a(H_m)$$

$$B = [44.9 - 6.55 * \log_{10}(H_b)]$$

$$C = 2 * \left[\log_{10} \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 + 5.4$$

修正係數

$$a(H_m) = [1.1 \log_{10}(f) - 0.7] * H_m - [1.56 \log_{10}(f) - 0.8]$$

其中 Frequency $f = 390$ MHz、基地台高度 $H_b = 15$ m、天線高度

$H_m = 1.5m$ 、 $d =$ 傳播距離(Propagation Distance)。

Link Budget 鏈路總值	Unit 單位	Outbound (Downlink) 下行鏈路		Inbound (Uplink) 上行鏈路	
		BS >> Portable		Portable >> BS	
		TX	RX	TX	RX
Dynamic sensitivity (min) 動態靈敏度	dBm		-105		-111
Rx antenna gain 接收天線增益	dB		0		7
Dual rx diversity gain 雙接收天線分集增益			0		3
Body loss 身體損失	dB		6.5		0
Cable & connector loss 纜線與接頭損失	dB		0		1.8
Required minimum power 最小功率需求	dBm		-98.5		-119.2
Output power 發射功率(瓦)	W	10		1.8	
Output power 發射功率(分貝)	dBm	40		32.6	
Tx antenna gain 發射天線增益	dBd	7		0	
Body loss 身體損失	dB	0		6.5	
Cable & connector loss 纜線與接頭損失		1.8		0	
Transmitted power ERP 發射功率ERP		45.2		26.1	
Design margin (99% AR) 設計預留值(99% AR)			13.0		13.0
TSS penetration loss TSS穿透損失			35.0		35.0
Total Available Link Budget 有效的總鏈路計算值			95.7		87.3

表 3 在 MTS1 基地台和 (MTP3250) 無線電手機於軌旁 TSS 室內使用的情況下之鏈路計算值[10]

Link Budget 鏈路權衡值	Unit 單位	Outbound (Downlink) 下行鏈路		Inbound (Uplink) 上行鏈路	
		BS >> Portable		Portable >> BS	
		TX	RX	TX	RX
Dynamic sensitivity (min) 動態靈敏度	dBm		-105		-111
Rx antenna gain 接收天線增益	dB		0		7
Dual rx diversity gain 雙接收天線分集增益			0		3
Body loss 身體損失	dB		6.5		0
Cable & connector loss 纜線與接頭損失	dB		0		1.8
Required minimum power 最小功率需求	dBm		-98.5		-119.2
Output power 發射功率 (瓦)	W	10		1.8	
Output power 發射功率 (分貝)	dBm	40		32.6	
Tx antenna gain 發射天線增益	dBd	7		0	
Body loss 身體損失	dB	0		6.5	
Cable & connector loss 纜線與接頭損失		1.8		0	
Transmitted power ERP 發射功率ERP		45.2		26.1	
Design margin (99% AR) 設計預留值(99% AR)			13.0		13.0
building loss B06建築穿透損失			20.0		20.0
Total Available Link Budget 有效的總鏈路計算值			110.7		102.3

表 4 在 MTS1 基地台和 (MTP3250) 無線電手機於 V26 車站旁建築室內使用的情況下之鏈路計算值[10]

從上述函數可知 Hata Model 的傳播損失與距離為線性關係，考量輕軌列車內穿透損失、TSS 穿透損失、B06 車站側邊建築穿透損失，對應穿透損失對應之距離如圖 11：

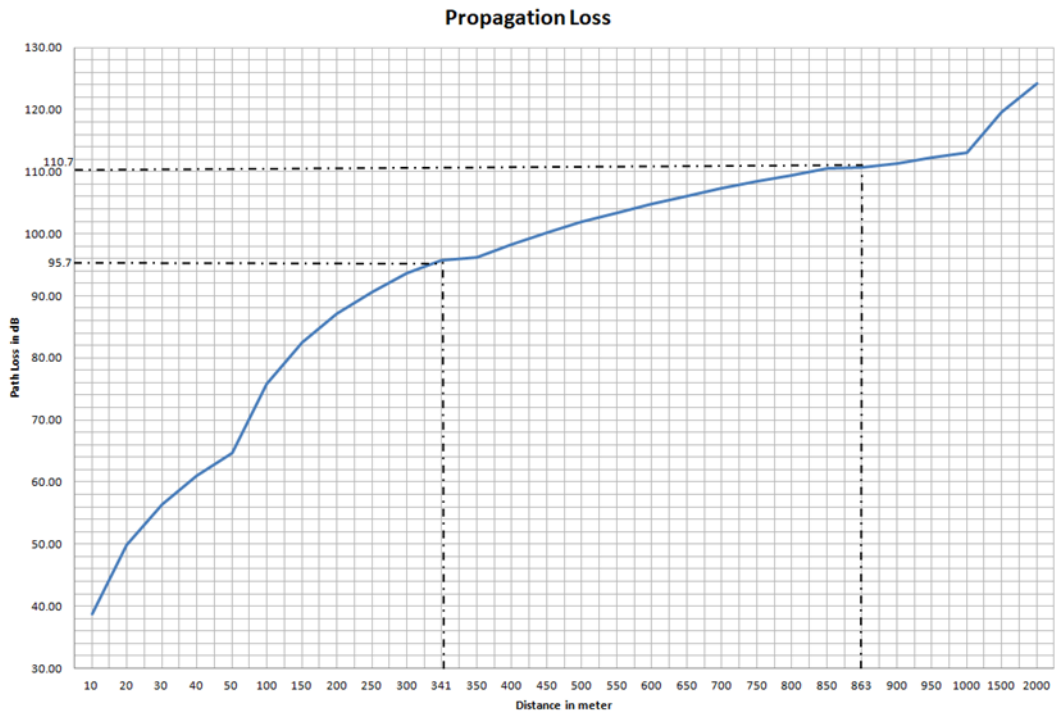


圖 11 對應穿透損失對應之距離[10]

依據 Hata 傳遞模型，考量 TSS（牽引變電站）穿透損失35dB 時，傳遞損耗計算95.7dB 對應到有效傳輸距離為341m；V26車站側邊建築穿透損失20dB 時，傳遞損耗計算110.7dB 對應到的有效傳輸距離為863m。另外 V26車站已考量無線電手機位於輕軌列車駕駛室內至少15dB 的穿透損失有效傳輸距離。

接著以有效傳輸距離，評估基地台間的距離是否符合需求。預估 TSS 之 V07基地台與 V07 TSS 之距離為120m，V26基地台與 V26 TSS 之距離為20m，皆在 Hata 傳遞模型的有效傳輸距離341m 之內；

預估 B06 車站之 V26 基地台與 V26 車站側邊建築實際距離為 20m，亦在 Hata 傳遞模型的有效傳輸距離 863m 之內。故新增 2 個基地台可滿足 TSS 及 V26 車站之涵蓋需求。

(五) 實際計算基地台間無線電接收訊號位準 (RSSI) 確認涵蓋率

(V07) 和 (V26) 站點上所建議的兩個新無線基地台之上行和下行鏈路的 RF 鏈路預估，將發射器 (手持無線電) 的所有增益，損耗和無線電發射功率到無線電基地台接收器的數值全部加總，計算無線電接收訊號位準 (RSSI) 是否高於定義的合格標準水平 -90 dBm 進而判斷無線電系統涵蓋改善方案有效。

計算範圍：因列車之行動無線電之涵蓋半徑通常寬於手持無線電 (因具備更高行動無線電功率輸出，用於外部天線等)，RF 鏈路預估將根據手持無線電計算並根據更嚴格的 99% 區域可靠度來計算。

損耗考量：下行和上行鏈路預估中，已包含從設備發射器 (例如基地台或手持無線電) 到無線電接收器側的所有可能的增益和損耗。這種從無線電發射器到無線電接收器的增益和損耗包括佈線損耗、天線增益、傳播損耗、穿透損耗等。

下表 5 下行鏈路性能部分，將發射器 V07 / V26 基地台的所有增

益，損耗和無線電發射功率到手持無線電接收器的數值全部加總，V07和 V26站點的計算無線電接收訊號位準（RSSI）具有更好的結果值。計算後的下行鏈路接收訊號位準 V07 = -54.8 dBm，V26 = -53.8 dBm，皆高於定義的合格標準水平 -90 dBm。

Unit 單位		ea	ea	Total Insertion Losses (dB)				DOWNLINK PERFORMANCE 下行鏈路性能(關鍵路徑鏈路預算) 頻率390 MHz					
Loss (dB/Unit) 損耗(dB/單位)		8	0.48	跳線 Jumper		dB	dB	dB	99% Recei ved 接收				
MTS Site MTS 場地	MTS Type MTS 類型	Location 位置	Antenna Label 天線標誌	7/8" RF Cable Loss 7/8" RF 電纜損耗	8	Antenna Gain Loss 天線增益損耗	Penetration Loss 穿透損耗	Reliability Margin (99%) 可靠性裕度	Antenna Coverage Area 天線涵蓋區域	Antenna Propagation Loss (50%) 天線傳送損耗 (50%)	Pr/carr dBm	Level 等級	dBm
V07	MTS1	V07車 站	11dBd八木天線至 V08	25	8	4.4	15	1	300	73.4	40	-54.8	
V26	MTS1	V26車 站	11dBd八木天線至 V27	20	6	3.4	15	1	300	73.4	40	-53.8	

表 5 V07/ V26場地 - 下行鏈路預算[5]

表6上行鏈路性能部分上，將發射器（手持無線電）的所有增益，損耗和無線電發射功率到無線電基地台接收器的數值全部加總，計算無線電接收訊號位準（RSSI）得出很好的結果值。計算出的上行鏈路接收訊號位準為（V07） = -79.5 dBm（V26） = -78.4 dBm。

Unit 單位		Loss (dB/Unit) 損耗(dB/單位)		ea		ea		dB		dB		m		dB		dB		dB		UPLINK PERFORMANCE (關鍵路徑鏈路預算) 上行鏈路性能 頻率 380 MHz		
MTS Site MTS 場地	MTS Type MTS 類型	Location 位置	Antenna Label 天線標誌	7/8" RF Cable Loss 7/8" RF 電纜損耗	跳線 Jumper	Total Insertion Losses (dB) 總插入損耗 (dB)	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	dB	99% Recei ved 接收	
																						Pr/carr
																			dBm		dBm	
V07	1	V07 車站	11dBd八木天線 至V08	25	8	4.4	6.5	15	0	1	300	73.1	73.1	13	13	13	13	13	13	13	32.6	-79.5
V26	1	V26 車站	11dBd八木天線 至V27	20	6	3.4	6.5	15	0	1	300	73.1	73.1	13	13	13	13	13	13	13	32.6	-78.4

表 6 V07/ V26場地 - 上行鏈路預算[5]

因此，根據數值得出的結論，V07和 V26站中添加新的無線電基地台，針對具有降級 RF 訊號區域，將能有效改善訊號。

(六) 淡海輕軌第一期工程無線電系統涵蓋改善方案目標如下：

- (1) 增強 V07車站與 V08車站之間訊號涵蓋。
- (2) V07 TSS 之室內涵蓋。
- (3) 增強 V26車站與 V27車站之間訊號涵蓋。

(4) V26車站附屬建築及 V26 TSS 室內涵蓋。

伍、結論與建議

考量公共工程及大眾運輸系統建設，勢必帶動原站區及軌道沿線周邊土地更新再發展，從商場、公務機關、學校到住宅區域，即便無法立即預見周邊土地發展，在系統建置屬長期使用的原則下，無線電系統應依路段線型、曲率及路線本身結構形式，以訊號沿著軌道佈設，方能符合設計預期。

為避免無線電涵蓋率受建案影響，要求廠商於設計時需執行無線電「場」模擬並於地圖畫出場域。基地台採沿線佈置做為基本功能訂定內容。另沿線場強不足部分廠商可依需求擇選無線電中繼站、放大器、天線及漏波電纜等各類設備來增加主線範圍無線電涵蓋率。此外基本功能訂定工程期間執行兩次無線電場強量測，第一次場強量測為無線電通訊系統設計前，第二次場強量測建議於可靠度驗證(RAM)展現之後再進行，且二次無線電涵蓋率均須符合規範要求。

除針對數位無線電系統場強量測資料作為設計考量外，建議於基本設計階段至工程發包後統包商設計階段，針對特殊路段應透過

政府公開資訊平台，取得建管系統及土地開發相關資訊，掌握建設路線周邊土地新建案資訊，並將最新地形地貌匯入模擬系統內評估，加上採用訊號沿著軌道佈設進行設計，必然能大幅降低驗收後使用困擾及無線電系統涵蓋改善之機率。

參考文獻

- [1] 新北市捷運局捷運線路網圖
<https://www.dorts.ntpc.gov.tw/>。
- [2] 臺北市政府捷運工程局「捷運通訊系統實務」(2021年6月)。
- [3] 中興工程顧問社「捷運通訊無線電 TETRA 系統簡介及經驗回饋」(2020年1月)。
- [4] 中國鋼鐵股份有限公司(CSC)「淡海輕軌運輸系統計畫第一期專用無線電動態場強分析報告」(民國104年4月)
中國鋼鐵股份有限公司(CSC)「淡海輕軌運輸系統計畫第一期專用無線電動態場強分析報告」(民國105年1月)
- [5] 中國鋼鐵股份有限公司(CSC)「淡海輕軌運輸系統計畫第一期 V07和 V26車站數位無線電通訊系統最終設計」(民國110年12月)
- [6] ASTS/RSEA/Hitachi「三鶯線捷運系統計畫統包工程無線電整體涵蓋區域現場勘查」(民國107年4月)
- [7] 中國鋼鐵股份有限公司(CSC)「安坑輕軌運輸系統計畫專用無線電動態場強分析報告」(民國106年11月)
- [8] 中興工程顧問股份有限公司第二期路網專用無線電通訊系統分析報告期末送審修正二版(民國111年8月)
- [9] 臺中捷運股份有限公司線路網圖
<https://www.tmrt.com.tw/metro-life/map>
- [10] 中國鋼鐵股份有限公司(CSC)「淡海輕軌運輸系統計畫第一期 V07和 V26車站新增無線基地台評估報告」(民國109年11月)